

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Jelić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Nikola Jelić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na prihvatanju mentorstva te pruženoj podršci prilikom izrade rada.

Zahvaljujem se Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na vođenju tijekom izrade završnog rada te na korisnim savjetima i pomoći, kako pri izradi teorijskog dijela, tako i pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Također se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje te Laboratorija za precizna mjerenja duljina na ukazanoj suradnji i pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Najveću zahvalu dugujem svojoj obitelji na velikoj potpori i strpljenju tijekom cijelog mog školovanja, a posebno tijekom fakultetskog obrazovanja

Nikola Jelić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **NIKOLA JELIĆ**

Mat. br.: **0035194745**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **KLASIFIKACIJA NEPRAVILNOSTI PRI TOPLINSKOM REZANJU**

Naslov rada na engleskom jeziku: **CLASSIFICATION OF IMPERFECTIONS IN THERMAL CUTTING**

Opis zadatka:

Opisati postupke toplinskog rezanja koji se primjenjuju u industrijskoj praksi. Definirati pojam rezljivosti metalnih materijala kao i primjenjivost plinskog, plazma i laserskog rezanja ovisno o vrsti i debljini materijala. Prikazati osnovne nepravilnosti reznih površina prema normi HRN EN ISO 17658.

U eksperimentalnom dijelu za odabranu debljinu osnovnog materijala odrediti parametre rezanja u cilju postizanja maksimalne brzine za rezanje plinskim plamenom i plazmom. Ispitivanje provesti na nelegiranom i visokolegiranom čeliku te aluminiju. Analizirati i klasificirati detektirane nepravilnosti prema HRN EN ISO 17658. Zaključno ocijeniti prikladnost odabranih parametara i ocijeniti kvalitetu reza prema HRN EN ISO 9013.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Izv.prof.dr.sc. Ilica Garašić

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

Slika 23. Proširenje reza	
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Rezljivost metalnih materijala.....	1
2. POSTUPCI TOPLINSKOG REZANJA	2
2.1. Plinsko rezanje	2
2.2. Plazma rezanje.....	8
2.3. Lasersko rezanje	14
3. ZAVARIVANJE – NEPRAVILNOSTI REZOVA PRI PLINSKOM REZANJU, REZANJU LASERSKIM SNOPOM I REZANJU PLAZMOM – NAZIVLJE (ISO 17658:2002; EN ISO 17658:2015).....	20
3.1. Područje primjene	20
3.2. Nepravilnosti na rubovima reza	20
3.3. Nepravilnosti površine reza.....	22
3.4. Troska.....	27
3.5. Pukotine.....	27
3.6. Ostale nepravilnosti.....	28
4. EKSPERIMENTALNI DIO	29
4.1. Oprema za rezanje	29
4.2. Materijal	31
4.3. Plan pokusa	32
4.3.1. Plazma rezanje nehrđajućeg čelika AISI 304.....	32
4.3.2. Plazma rezanje Al legure 5083.....	35
4.3.3. Plinsko rezanje čelika S235.....	38
4.4. Ukratko o normi HRN EN ISO 9013	40
4.4.1. Oznake i definicije objašnjene slikama	41
4.4.2. Prosječna visina neravnina	42
4.4.3. Kvaliteta površine reza.....	43
4.4.4. Točke mjerenja	44
4.5. Mjerenje hrapavosti uređajem s ticalom	44
5. ZAKLJUČAK.....	48
LITERATURA.....	49
PRILOZI.....	51

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
T_p	°C	temperatura zapaljenja
T_t	°C	temperatura taljenja
T_{to}	°C	tempratura taljenja oksida
C_{ekv}	-	ekvivalentni sadržaj ugljika
f	mm	žarišna duljina leće
λ	μm	valna duljina svjetlosti

SAŽETAK

Postupci toplinskog rezanja imaju široku primjenu u industriji. Najčešći postupci koji se koriste su plinsko, plazma i lasersko rezanje. Ovisno o vrsti i debljini materijala koristi se jedan od navedenih postupaka. U radu su opisani postupci toplinskog, plazma i laserskog rezanja. Također su prikazane osnovne nepravilnosti reznih površina koje se pojavljuju u industrijskoj praksi prema normi HRN EN ISO 17658.

Eksperimentalni dio izveden je u Laboratoriju za zavarivanje. U eksperimentalnom dijelu rada određeni su parametri rezanja kojima se postiže maksimalna brzina za rezanje plinskim plamenom i plazmom za određenu debljinu osnovnog materijala. Ispitivanje je provedeno na nelegiranom i visokolegiranom čeliku te aluminiju. Nakon ispitivanja obavljena je analiza i klasifikacija detektiranih nepravilnosti prema HRN EN ISO 17658. Zaključno je ocijenjena prikladnost odabranih parametara te kvaliteta reza prema HRN EN ISO 9013.

4. UVOD

Budući da je postupak rezanja u strojogradnji u većini slučajeva prvi u tehnološkom slijedu operacija izrade neke konstrukcije, potrebno je pravilno izabrati najadekvatniji postupak kako bi se proizvodnja odvijala bez prekida te isporučile ugovorene količine određenih proizvoda. Također treba staviti naglasak i na kvalitetu reza zbog toga što nakon operacija rezanja slijede ostale tehnološke operacije. Kvalitetnim se rezom izbjegava nepotrebna naknadna obrada prije slijedeće operacije što u tom slučaju povisuje cijenu proizvoda. Samo pravilnom upotrebom određene tehnologije rezanja moguće je postići konkurentnost poduzeća na tržištu. Kako bi se to postiglo, potrebno je u obzir uzeti sve čimbenike koji utječu na kvalitetu reza da bi se ostvarila što je više moguće ekonomična proizvodnja i izbjeglo stvaranje gubitaka. Cijena pojedinog postupka toplinskog rezanja izražava se po satu rezanja ili po metru reza. Međutim, to nije najvažniji kriterij prilikom izbora postupka rezanja jer je moguće da određeni postupak rezanja bude jeftiniji po prethodno navedenim kriterijima, a cijena naknadne obrade višestruko veća od cijene naknadne obrade potrebne nakon nekog drugog postupka rezanja.

1.1. Rezljivost metalnih materijala

Rezljivost metalnih materijala svojstvo je koje se najviše spominje u kontekstu postupaka obrade odvajanjem čestica. Definira se kao sposobnost materijala da se u određenim uvjetima može obraditi nekim postupkom obrade odvajanjem čestica odnosno postupkom rezanja. To je kompleksno svojstvo uvjetovano mehaničkim svojstvima materijala koji se obrađuje, postupkom obrade i parametrima rezanja. Univerzalna metoda za određivanje rezljivosti ne postoji. Rezljivost određenog materijala najčešće se izražava kvalitativno. [1]

Svojstva materijala koja uobičajno pridonose boljem ponašanju u eksploataciji najčešće pogoršavaju rezljivost. Rezljivost materijala ovisi o: mikrostrukturi, veličini zrna, prethodnoj toplinskoj obradi, kristalnoj rešetki, postupku proizvodnje materijala, tvrdoći, granici razvlačenja, vlačnoj čvrstoći, koeficijentu toplinskog rastezanja te modulu elastičnosti.

5. POSTUPCI TOPLINSKOG REZANJA

Najčešći postupci toplinskog rezanja koji se koriste u industrijskoj praksi su plinsko rezanje (mlazom kisika uz korištenje plinskog plamena), rezanje mlazom plazme te rezanje laserom.

Plinsko je rezanje najstariji i najčešće primjenjivan postupak. Koristi se za rezanje materijala debljine 3 - 300mm, a uz posebne mlaznice i preko 1000 mm za nelegirane čelike. Postiže se dobra kvaliteta reznih površina uz primjenu pravilnih parametara rezanja. U praksi je česta primjena automatiziranih numerički upravljanih strojeva s više glava za rezanje koje su se pokazale kao veoma produktivne. Rezanje mlazom plazme ekonomično je za materijale debljine 3 - 20 mm, ali kvaliteta reza nije dobra kao kod rezanja laserom. Laser je našao svoju primjenu za rezanje relativno malih debljina nelegiranog čelika (2-3 mm). Budući da se radi na rješenjima za povećanje snage lasera, u budućnosti će se moći ekonomično rezati i limovi veće debljine. [2]

2.1. Plinsko rezanje

Plinsko je rezanje postupak prilikom kojega metal izgara u struji čistog kisika pri temperaturama nižim od temperature taljenja. Troska, odnosno oksidi metala nastali izgaranjem ispuhuju se mlazom kisika i tako nastaje rez. Kako bi proces rezanja započeo potrebno je materijal na mjestu predviđenog reza zagrijati na temperaturu zapaljenja i tek nakon toga dovesti kisik.

Zagrijavanje materijala do temperature zapaljenja ostvaruje se plamenom za predgrijavanje koji se najčešće sastoji od acetilena i kisika ili propan-butana i kisika. Kao što je prikazano Slikom 1. kisik za izgaranje se dovodi kroz središnji dio sapnice, dok se gorivi plin i kisik za zagrijavanje dovode kroz provrte izvan središta sapnice. Kvaliteta reza koja se dobije plinskim rezanjem može biti vrlo dobra te je moguće dobiti zadovoljavajuću hrapavost, ali uz ispravno odabrane parametre (vrsta sapnice, tlak i čistoća kisika i gorivih plinova, brzina rezanja te razmak između sapnice i radnog komada).

Materijali koji se režu ovim postupkom moraju ispuniti slijedeće uvjete:

- $T_p < T_t$;

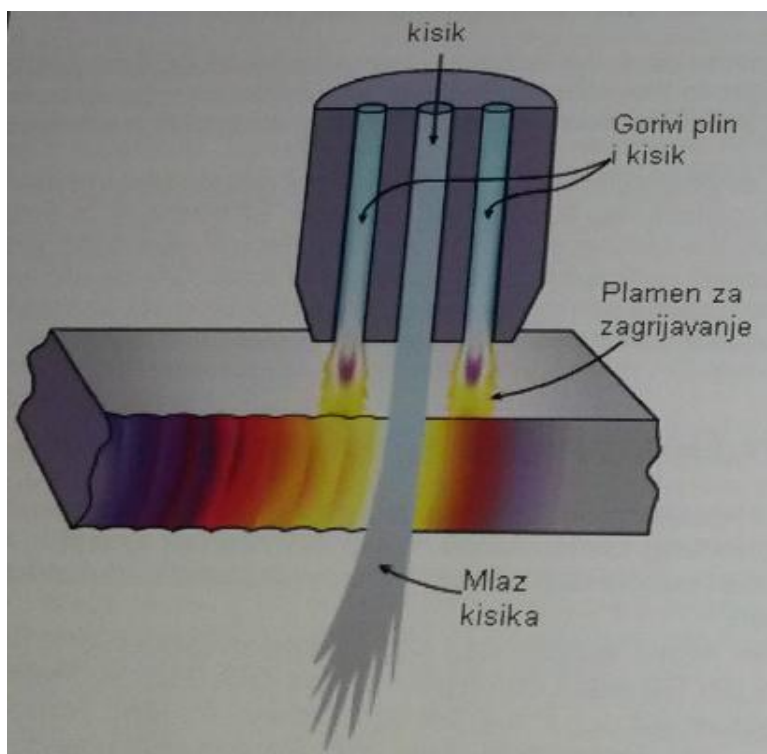
T_p - temperatura zapaljenja

T_t - temperatura taljenja materijala koji se reže

- $T_{to} < T_t$

T_{to} - temperatura taljenja oksida

- količina ukupno dovedene topline mora biti dovoljna za održavanje temperature zapaljenja.



Slika 1. Princip plinskog rezanja [3]

Iz uvjeta rezljivosti može se zaključiti da se plinskim postupkom (uz standardne uvjete) ne mogu rezati Al i Al-legure, Cu i Cu-legure, sivi lijev te svi ostali metali koji ne ispunjavaju uvjete rezljivosti. Čelici, koji u svom sastavu nemaju previsok postotak kemijskih elemenata koji bi mogli utjecati na osnovne uvjete rezanja, odlično se režu. Na proces plinskog rezanja utječe niz čimbenika među kojima su najvažniji:

- kemijski sastav čelika
- temperaturno stanje radnog komada
- debljina radnog komada
- homogenost radnog komada s gledišta nečistoća i uključaka

- čistoća kisika
- temperatura plinskog plamena
- vrste gorivog plina
- tehnološki parametri (brzina rezanja, udaljenost sapnice od radnog komada, promjer sapnice, tlak plinova).

Sadržaj ugljika je ključan za ocjenu rezljivosti plinskim plamenom. Porastom sadržaja ugljika raste temperatura izgaranja, a time se istodobno snižava temperatura taljenja. Osim ugljika na rezljivost utječu i legirni elementi u ovisnosti o njihovim masenim udjelima. Veći udio legirnih elemenata snižava rezljivost. Tablicom 1. prikazan je utjecaj pojedinih legirnih elemenata na rezljivost čelika. [3]

Tablica 1. Utjecaj legirnih elemenata na rezljivost čelika plinskim postupkom [3]

Legirni elementi	Gornja granica masenog udjela do koje je moguće rezanje	Napomena
C	1,6 % C	kod % C > 0,45 bez predgrijavanje dolazi do otvrdnjavanja i nastanka pukotina
Mn	13 % Mn	izvedivo kod % C ≤ 1,3
Si	2,9 % Si	izvedivo kod % C ≤ 0,2 do 4 % Si
Cr	1,5 % Cr	izvedivo kod % C ≤ 0,2
W	10 % W	izvedivo kod 0,5 % Cr, 0,2 % Ni, 0,8 % C
Ni	7,0 % Ni	izvedivo kod 0,3 ≤ % C ≤ 0,5, do 34 % Ni
Mo	0,8 % Mo	pri većem sadržaju W, Cr i C nije moguće rezanje

Za brzu procjenu rezljivosti čelika plinskim postupkom, za određivanje temperature predgrijavanja te za procjenu otvrdnuća služi izračun C_{ekv} koji je moguće izračunati brojnim formulama od kojih je jedna prema Voldrichu i Harderu [3]:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{4} \quad (1)$$

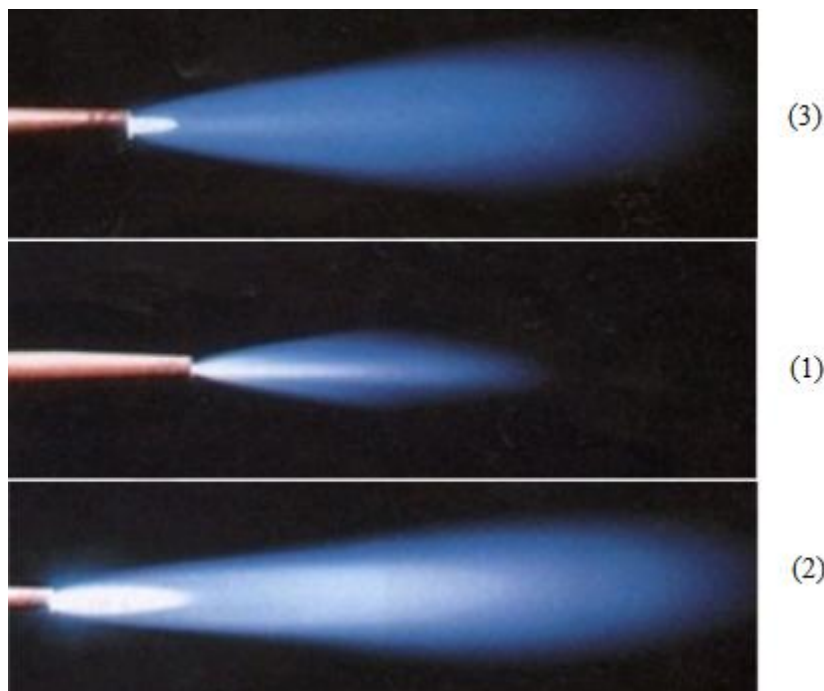
Ukoliko je $C_{ekv} < 0,4$ čelike je moguće plinsko rezati bez predgrijavanja, a u slučaju veće vrijednosti, prije rezanja čelik je potrebno podvrgnuti predgrijavanju. Neovisno o potrebi predgrijavanja, viša temperatura radnog komada utjecat će na manju potrošnju plinova za rezanje te bolju kvalitetu reza. Debljina radnog komada utječe na brzinu rezanja i širinu reza, uz kemijski sastav utječe i na temperaturu predgrijavanja, određuje veličinu rezne i vanjske sapnice plamenika te time utječe i na potrošnju plinova. Prije plinskog rezanja potrebna je dodatna priprema površine kako bi se uklonile razne nečistoće i oksidi.

Kisik koji se koristi za plinsko rezanje je standardni industrijski kisik čistoće 99,5 %. Povećanjem čistoće moguće je postići veće brzine rezanja. Vrsta gorivog plina veoma je važan čimbenik kod procesa plinskog rezanja. Kao što je već ranije navedeno, acetilen i propan-butan najčešći su gorivi plinovi korišteni za plinsko rezanje. Acetilen izgara temperaturom od oko 3100 °C. Generira plamen visoke ujednačenosti, a u plinskom plamenu omjer kisika i acetilena kreće se u rasponu od 1,1 do 1,2. Propan-butan je plin niske cijene kojeg je moguće lako nabaviti u velikim količinama. Temperatura plamena propan-butana iznosi oko 2810 °C. Omjer kisika i propan-butana u plinskom plamenu kreće se u rasponu od 4 do 4,5. Acetilen ima mnogo veću toplinsku energiju primarnog plamena dok propan-butan ima znatno veću energiju sekundarnog plamena te ukupnu energiju plamena. Primarni plamen najviše utječe na iskoristivost toplinske energije u procesu kao što je prikazano Slikom 2.



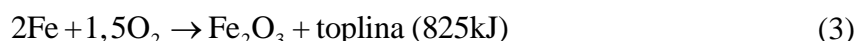
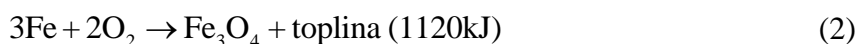
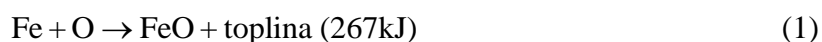
Slika 2. Iskoristivost toplinske energije po dubini plamena [3]

Slikom 3. prikazane su moguće vrste plinskog plamena. Ovisno o omjerima kisika i gorivih plinova postoje oksidirajući (1), reducirajući (2) te neutralni plamen (3). Podjednakim omjerom plinova održava se neutralni plamen koji se koristi za rezanje manjih debljina. Reducirajući plamen koji se postiže smanjenim udjelom kisika koristi se za rezanje odljevaka. Oksidirajući plamen koji ima veći udio kisika primjenjuje se za rezanje materijala velikih debljina. [4]



Slika 3. Vrste plamena kod plinskog postupka rezanja [5]

Temperatura zapaljenja T_p za čelike iznosi oko $870\text{ }^{\circ}\text{C}$. U procesu dolazi do kemijske reakcije kisika sa željezom odnosno do ubrzane oksidacije željeza. Proces oksidacije odvija se u 3 koraka [4] :



Uloge gorivih plinova u procesu su:

- postizanje temperature zapaljenja materijala
- dovođenje topline koja pospješuje kemijske reakcije oksidacije

- stvaranje zaštitne atmosfere između kisika koji reagira te okolne atmosfere
- uklanjanje korozijskih produkata, okujina, boje te ostalih stranih medija s površine materijala koji mogu usporiti ili onemogućiti rezanje.

Intenzitet zagrijavanja na temperaturu T_p utječe na pojavu nepravilnosti reza. Prebrzo zagrijavanje uvjetuje pojavu nepravilnosti, stoga su razvijeni sustavi za zagrijavanje u dva ili više prolaza kako bi se to izbjeglo. Takav se način zagrijavanja najčešće koristi pri rezanju velikih pozicija.

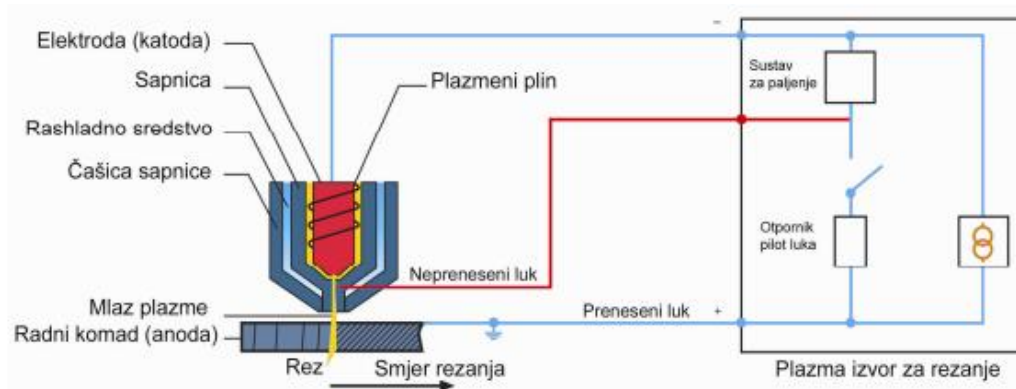
Postupci plinskog rezanja provode se ručno te automatizirano. Ručni se postupak koristi prilikom rezanja otpadnog metala, rezanje srha kod odljevaka, tj. u svim slučajevima gdje se ne zahtjeva visoka točnost reza i kvaliteta rezne površine. S druge strane, automatizirano se rezanje koristi za slučajeve gdje je zahtjevana visoka kvaliteta i preciznost te u velikoserijskoj proizvodnji. Princip rada obje izvedbe rezanja je identičan. Oprema za ručno plinsko rezanje sastoji se od pištolja za plinsko rezanje, sapnica za rezanje različitih debljina materijala, crijeva za kisik i gorive plinove, regulatora tlaka i spremnika kisika i gorivih plinova, zaštitne opreme za radnike te uputa proizvođača za korištenje opreme. Slika 4. prikazuje pištolj za ručno plinsko rezanje. Uz prethodno navedeno, oprema za automatizirano plinsko rezanje najčešće se sastoji još od uređaja za gibanje pištolja, opreme za montažu i namještanje pištolja, radnog stola, manipulatora materijala koji se reže te uređaja za navođenje višestrukih pištolja kojima se postiže temperatura zapaljenja. [4]



Slika 4. Pištolj za ručno plinsko rezanje [6]

2.2. Plazma rezanje

Razvoj plazma rezanja započeo je 50-ih godina prošlog stoljeća zbog nemogućnosti rezanja nehrđajućih čelika, aluminija i bakra tada dostupnim plinskim postupkom. Plazma je stanje tvari u kojoj su plinovi ionizirani, slična je fluidu te se još naziva i četvrtim agregatnim stanjem. Plazma se dobiva uspostavljanjem električnog luka između elektrode spojene na negativan pol izvora struje i radnog komada (preneseni luk) ili sapnice pištolja uređaja (nepreneseni luk) (slika 5.). Temperature plazmenog električnog luka najčešće se kreću u rasponu od 10 000 °C do 14 000 °C, a moguće je postizanje mnogo viših temperatura. Nepreneseni luk ima primjenu u rezanju materijala koji nisu električki vodljivi (npr. polimeri) te za paljenje električnog luka (pilot luk). Za sve ostale materijale koristi se preneseni luk kojim se ostvaruje puno veći unos toplinske energije u radni komad. U tom je slučaju radni komad dio strujnog kruga. [4, 7]



Slika 5. Preneseni i nepreneseni luk kod plazma rezanja [8]

Električni se luk održava u cilindričnom kanalu hlađenom vodom. U kanal se pod tlakom dovodi plin (Ar, H₂, N₂, njihove mješavine, zrak ili O₂) koji prolaskom električnog luka disocira i ionizira na račun energije električnog luka. Na taj način dobiva se mlaz plazme visoke temperature i koncentrirane gustoće snage koji taljenjem može rezati sve metale. Nakon izlaska mlaza plazme iz sapnice dolazi do prenošenja energije preuzete iz električnog luka na rezni komad i plin se vraća u stabilno stanje.

Postupak plazma rezanja može se provoditi ručno, robotom ili strojno mehanizirano. Udaljenost između radnog komada i sapnice tokom cijelog procesa rezanja mora biti približno

jednaka kako bi se ostvario ujednačen rez. Budući da su temperature koje se postižu prilikom rezanja plazmom iznimno visoke, dolazi do neizbježne potrošnje određenih dijelova. To se

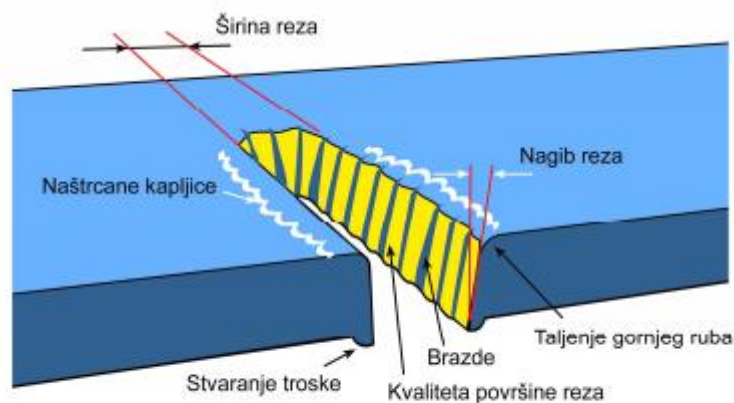
prije svega odnosi na sapnice i elektrode koje se moraju mijenjati nakon vremena propisanog od strane proizvođača opreme. Konstantnu kvalitetu rezova moguće je postići samo pravovremenom izmjenom potrošnih dijelova.

Najvažniji čimbenici koji utječu na kvalitetu procesa rezanja plazmom:

- jakost struje
- tlak i vrsta plina
- brzina rezanja
- istrošenost katode i sapnice
- udaljenost sapnice od radnog komada.

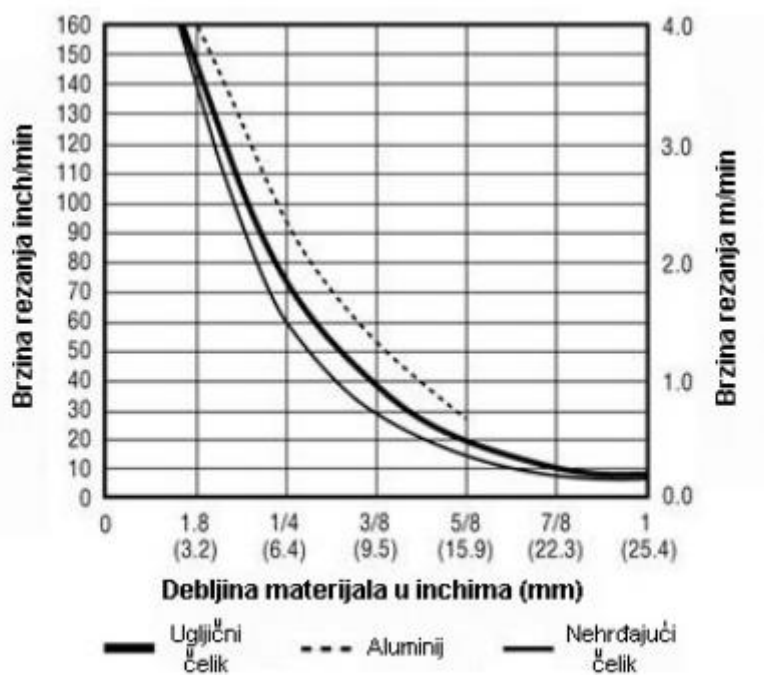
Istrošenost sapnice ima najveći utjecaj na pojavu nepravilnosti okomitosti reza. Istrošenost katode također ima utjecaj na pojavu prethodno navedene greške, ali u manjoj mjeri. Parametri brzina rezanja i jakost struje u najvećoj mjeri mogu utjecati na pravokutnost reza. Jakost struje kod rezanja ovisi o vrsti i debljini materijala koji se reže te o veličini sapnice, a kreće se u raponu 30 – 1000 A. U cilju optimizacije produktivnosti i brzine rezanja, koristi se najveća sapnica te najveća jakost struje koju sustav vođenja sapnica dozvoljava.

Posljedica prevelike ili premale brzine rezanja je loša kvaliteta reza. Za različite materijale postoje različite optimalne brzine rezanja koje će osigurati ravan i čiste rez bez troske. Ako je brzina rezanja prevelika, luk će zaostajati i oscilirati što će izazvati stepeničaste brazde u obliku slova S, velik nagib reza te nastajanje troske s donje strane reza. Uklanjanje troske, nastale kao posljedica prevelike brzine rezanja, iznimno je teško pa se u tom slučaju primjenjuje naknadno brušenje. U slučaju prevelike brzine rezanja moguće je i da plazma ne penetrira skroz kroz materijal. Ako je brzina rezanja premala, širina reza će biti veća, a rastaljeni materijal neće biti ispuhan plinom nego će se nakupljati na dnu reza kao troska koju je lako ukloniti, za razliku od troske koja nastaje kod prevelike brzine rezanja. Na Slici 6. prikazane su karakteristike reza (širina i nagib) te određene pogreške koje se pojavljuju prilikom rezanja plazmom.



Slika 6. Izgled reza kod plazma rezanja [9]

Slika 7. prikazuje ovisnost brzine rezanja o debljini različitih materijala pri kojoj se postiže zadovoljavajuća kvaliteta reza. Vidljivo je da se aluminij može rezati najvećom brzinom i to u cijelom rasponu debljina materijala gdje se rezanje plazmom koristi. S druge strane brzine rezanja nehrđajućeg čelika su najmanje.



Slika 7. Dijagram brzine rezanja u ovisnosti o debljini različitih materijala [10]

Optimalno rezanje plazmom različitih materijala i debljina ne može se provoditi uporabom samo jednog plazmenog plina. Kako bi se dobio rez koji ne treba naknadnu obradu potrebno je prilagoditi plazmeni i dodatni plin ovisno o materijalu koji se reže. Pri odabiru tehničkog

plina najvažniju ulogu imaju njegova fizička svojstva, kao što su ionizacija i energija disocijacije, toplinska vodljivost, atomska težina i kemijska reaktivnost. Djelovanje pojedinih plinova, odnosno mješavina na kvalitetu reza, prikazano je u tablici 2.

Tablica 2. Kombinacije plinova kod rezanja plazmom [11]

Materijal	Plazmeni plin	Dodatni plin	Opaska
Konstrukcijski čelik	Zrak	Zrak	moguće stvaranje nitrida na površini reza
	Kisik	Zrak ili kisik	nema stvaranja nitrida na površini reza manje troske nego kod zraka troska se lako uklanja
	Kisik	Kisik ili kisik/dušik	kvaliteta reza usporediva s laserom u području tankih limova
Visokolegirani čelik	Zrak	Zrak	hrapava i oksidirana površina reza malo srha
	Argon/vodik	Dušik	glatka i sjajna površina reza pojava srha pri malim debljinama
	Argon/vodik/dušik	Dušik	glatka i sjajna površina reza zbog dušika manji srh ili bez srha
	Dušik	Dušik/vodik	sjajna površina reza bez srha u području tankih limova
Aluminijske legure	Zrak	Zrak	hrapava površina reza
	Argon/vodik	Zrak ili dušik	glada površina reza nego sa zrakom približno okomita površina reza
	Zrak	Dušik/vodik	okomita površina reza u području tankih limova

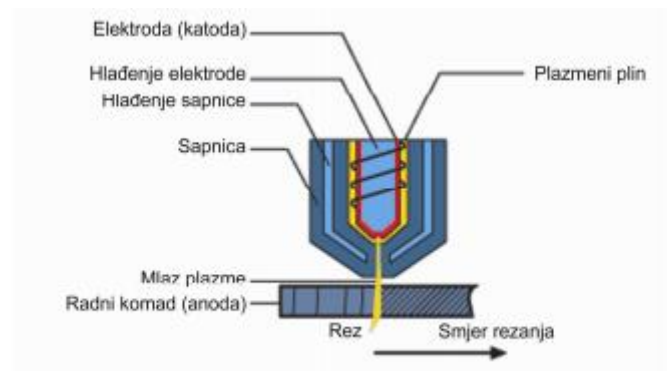
Ovisno o zadatku rezanja, vrsti i debljini materijala, danas su na raspolaganju slijedeće varijante postupka:

- rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima (standardna plazma)
- rezanje plazmom sa sekundarnim medijem u atmosferskim uvjetima ili u vodi
- rezanje plazmom sa suženim plazmenim lukom.

Rezanje plazmom bez sekundarnog medija koristi se kod:

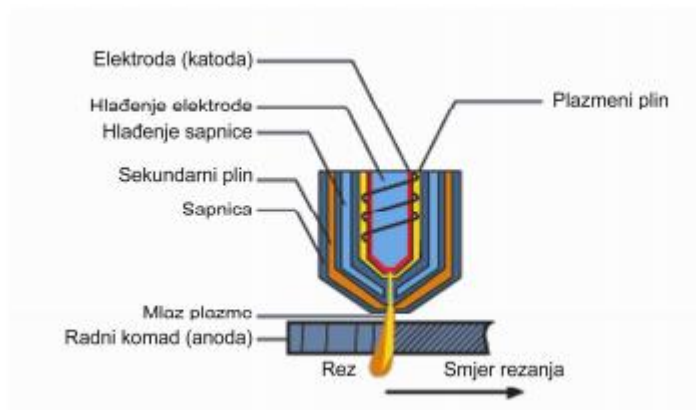
- ručnog rezanja plazmom i žlijebljenja
- manjeg broja dijelova koji se režu, odnosno manje debljine limova
- ne previsokih zahtjeva na kvalitetu reza.

Slikom 8. prikazani su dijelovi pištolja i sredstva za rezanje plazmom bez sekundarnog medija. Za ovu inačicu rezanja postoje mnogobrojni slučajevi primjene s CNC upravljanim sustavima za vođenje plazma pištolja, npr. kod proizvodnje panela u brodogradnji, gdje je rezanje plazmom neposredna priprema za zavarivanje, kod završne obrade i pakiranja limova u čeličanim te kod robotiziranog rezanja cijevi, I - profila i plosnatih profila s izbočinama. Pri rezanju plazmom bez sekundarnog medija koristi se samo jedan plin (zrak ili dušik) koji ujedno hladi i razvija luk plazme. Ovaj se postupak uglavnom koristi za materijale tanje od 16 mm i struje do 100 A. [11]



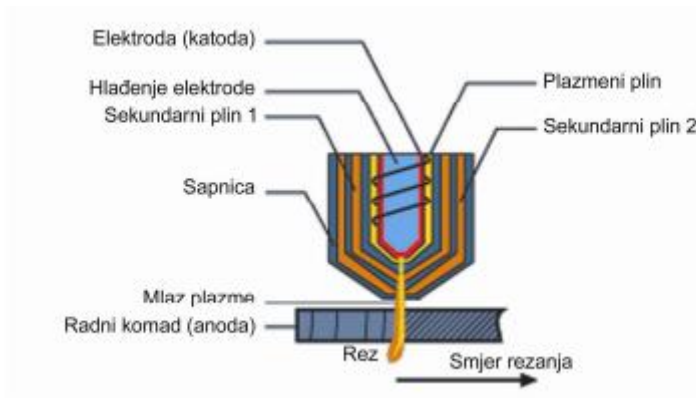
Slika 8. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija [9]

U postupku rezanja plazmom sa sekundarnim medijem koriste se dva plina: jedan kao plazmeni plin i drugi kao zaštitni plin. Zaštitni se plin koristi za zaštitu područja oko samog reza od utjecaja atmosfere, čime se dobiva čišći rez i usmjereniji električni luk. Ova varijanta rezanja plazmom je dosta zastupljena u praksi jer se raznim kombinacijama plinova može dobiti najbolja kvaliteta reza za zadani materijal. Postupak se može izvoditi i na zraku (slika 9.) i u vodi. U prethodno navedenoj varijanti s vodom, voda se koristi kao zaštitni plin te omogućava bolje hlađenje sapnice i radnog komada, kao i poboljšanu kvalitetu reza kod nehrđajućih čelika. Maksimalna debljina lima koji se može rezati suhim rezanjem plazmom iznosi 180 mm pri jačini struje 600 A, a kod podvodnog rezanja iznosi 100 mm pri jačini struje od 750 A. [11]



Slika 9. Plazma rezanje sa sekundarnim medijem [9]

Rezanjem plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka (precizno plazma rezanje) (slika 10.) dobiva se kvalitetan rez kod rezanja tanjih materijala (do 12 mm) pri manjim brzinama. Poboljšana kvaliteta reza rezultat je korištenja tehnologije povećanog sužavanja luka povećanjem gustoće energije električnog luka, dok su manje brzine rezanja potrebne kako bi se ostvarili precizniji pomaci kod rezanja. Koristi se samo kod strojno mehaniziranih postupaka rezanja.

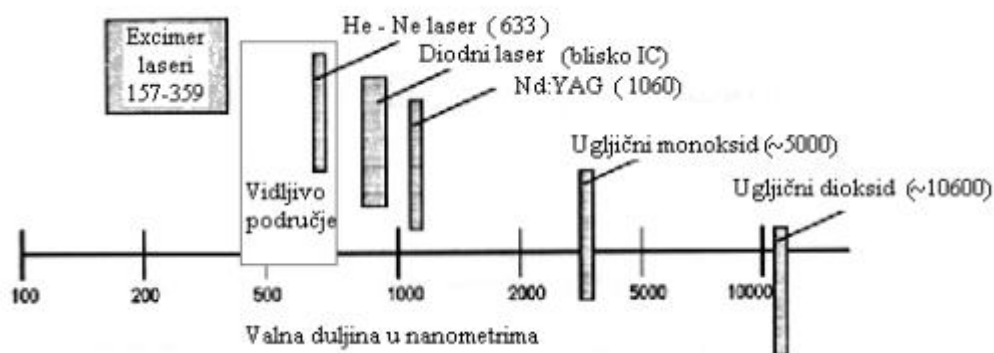


Slika 10. Precizno plazma rezanje [9]

2.3. Lasersko rezanje

LASER (eng. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti simuliranom emisijom zračenja. Laser je generator monokromatske (jedna valna duljina), koherentne (valovi su iste faze i amplitude) i usmjerene (mala divergencija) svjetlosti. Glavno je svojstvo ovakve svjetlosti mogućnost fokusiranja na točku malog promjera ($< 1 \text{ mm}$) što je nemoguće kod prirodne svjetlosti. [12]

Laseri se razlikuju prema vrsti aktivnog materijala koji služi za pojačavanje svjetlosti. U procesima rezanja koriste se CO_2 i Nd:YAG laseri, koji su ime dobili prema vrsti aktivnog materijala. Valna duljina emitirane svjetlosti (λ) je značajka svakog lasera. λ je funkcija razlike energetske stanja atoma/molekula aktivnog medija. Valne duljine emitirane svjetlosti pojedinih lasera prikazuje slika 11.



Slika 11. Valne duljine industrijskih lasera [13]

Laser s plinovitim medijem, CO_2 laser, ima za aktivni materijal mješavinu plinova N_2 , He te CO_2 . CO_2 laser emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ($\lambda = 10,6 \text{ }\mu\text{m}$). Područja primjene industrijskog CO_2 lasera su rezanje i zavarivanje.

Nd:YAG laser ima kruti aktivni medij „Itrij-Aluminij-Granat“, kod kojeg je približno 1 % atoma itrija zamijenjeno atomima neodimija (Nd). Neodimij je aktivni materijal. Nd:YAG laser emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ($\lambda = 1,06 \text{ }\mu\text{m}$). Nd:YAG laser koristi se za označavanje, zavarivanje i rezanje elektroničkih komponenti. Primjenu pronalazi i u mikromehanici. Valne duljine oba lasera nalaze se u infracrvenom području pa zbog toga nisu vidljive golim okom. [12]

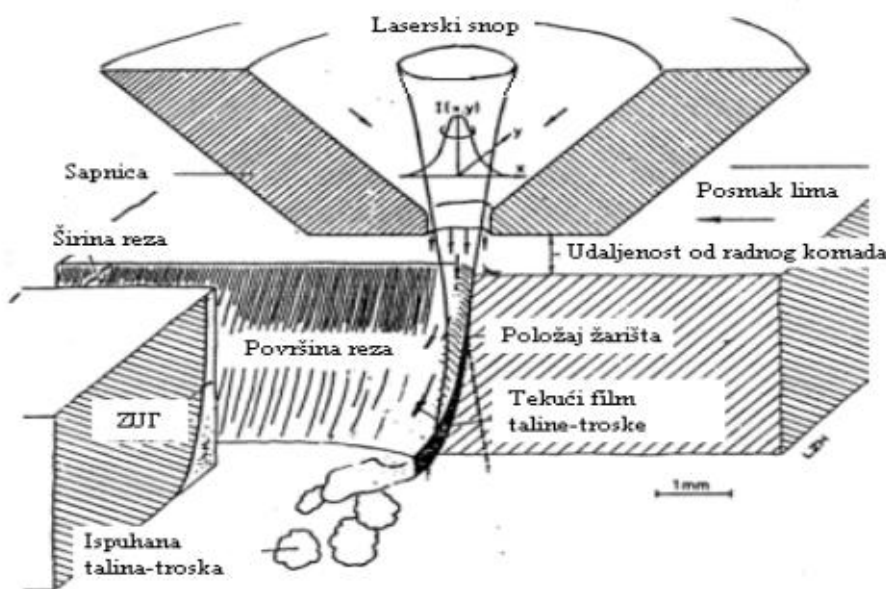
Najraširenija primjena industrijskih lasera je rezanje materijala. Zbog velikog broja prednosti u odnosu na ostale postupke rezanja, primjenjuje se u gotovo svim granama industrije, od mikroelektrike do brodogradnje. Najveće prednosti laserskog rezanja su:

- visoka gustoća snage odnosno mali unos topline

- uska zona utjecaja topline
- male deformacije radnog komada
- velike brzine rezanja
- visoka kvaliteta reza
- visoka fleksibilnost.

Visoki investicijski troškovi te nizak stupanj iskoristivosti energije najveći su nedostaci tehnologije rezanja laserom, ali oni se mogu nadoknaditi velikom brzinom rezanja, nepotrebnom naknadnom obradom obradka te visokom kvalitetom reza.

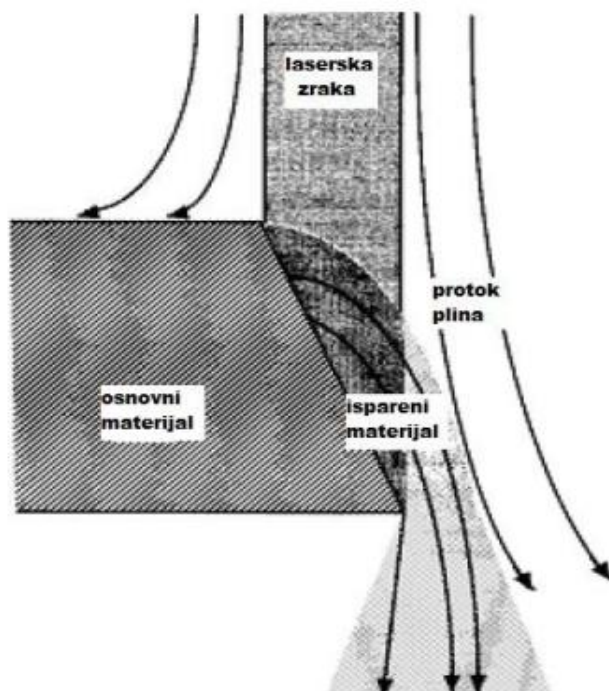
Pri procesu rezanja laserski snop gustoće snage 10^4 do 10^6 W/mm² prolazi kroz sapnicu širine ~ 1 mm. Na površini radnog komada ili malo ispod ($z = 0$ do $-0,5$ mm) nalazi se žarište snopa z . Udaljenost sapnice od radnog komada iznosi 0,5 do 1 mm. Mlaz plina iz sapnice sudjeluje u procesu rezanja ispuhujući rastaljeni metal te štiti optiku za fokusiranje od štrcanja i dima. Fokusna je optika ujedno gornji dio komore kroz koju stlačeni plin dolazi do sapnice. Slikom 12. prikazana je shema rezanja laserom.



Slika 12. Shema rezanja laserom [13]

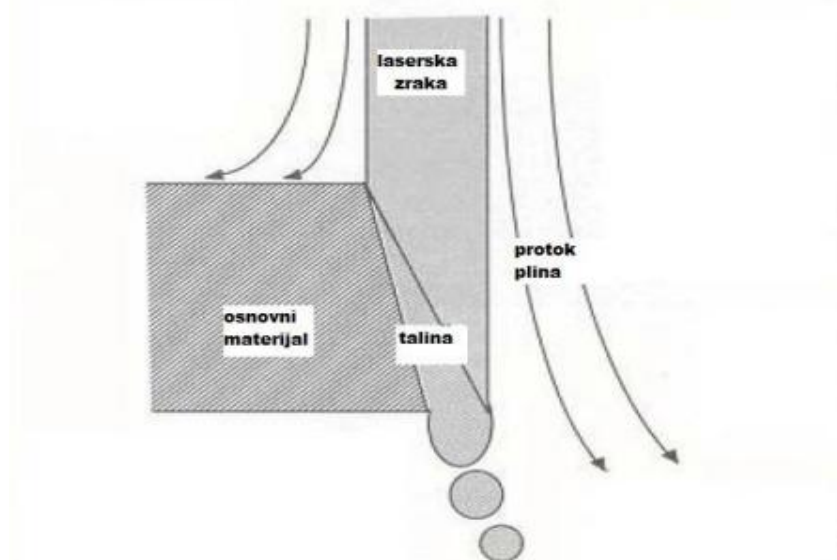
Postoje tri varijante rezanja laserom: rezanje isparavanjem, rezanje taljenjem te rezanje isparavanjem.

Do procesa rezanja isparavanjem dolazi kada laserski snop zagrije i ispari materijal u zoni reza koji se onda izbacuje uz pomoć plina za rezanje. Rezanje isparavanjem koristi se kod materijala koji se ne tale, kao što su drvo i neki polimeri. Plin za rezanje je najčešće zrak ili dušik, a za neke primjene koristi se i argon. Slika 13. prikazuje postupak laserskog rezanja isparavanjem.



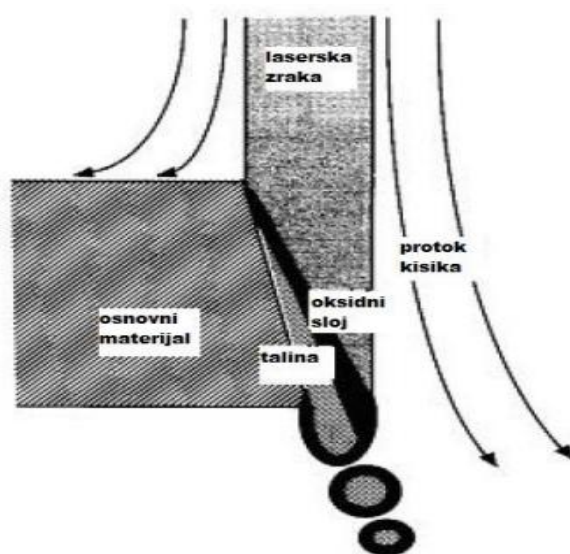
Slika 13. Postupak laserskog rezanja isparavanjem [14]

Rezanjem taljenjem rastaljeni se materijal ispuhuje mlazom plina iz zone rezanja, što zahtjeva manji unos energije nego kod rezanja isparavanjem. Plinovi za rezanje koji se koriste su zrak, dušik te u nekim slučajevima argon. Tlak plina za rezanje najčešće iznosi nekoliko bara, a moguće je i rezanje visokim tlakom do oko 30 bara, kojim se postižu velike brzine rezanja. Ovom varijantom rezu se metali i nemetali koji se tale, a zbog manjeg unosa energije širina reza i zona utjecaja topline su vrlo mali te je bolja kvaliteta površine reza. Slika 14. prikazuje postupak laserskog rezanja taljenjem.



Slika 14. Postupak laserskog rezanja taljenjem [14]

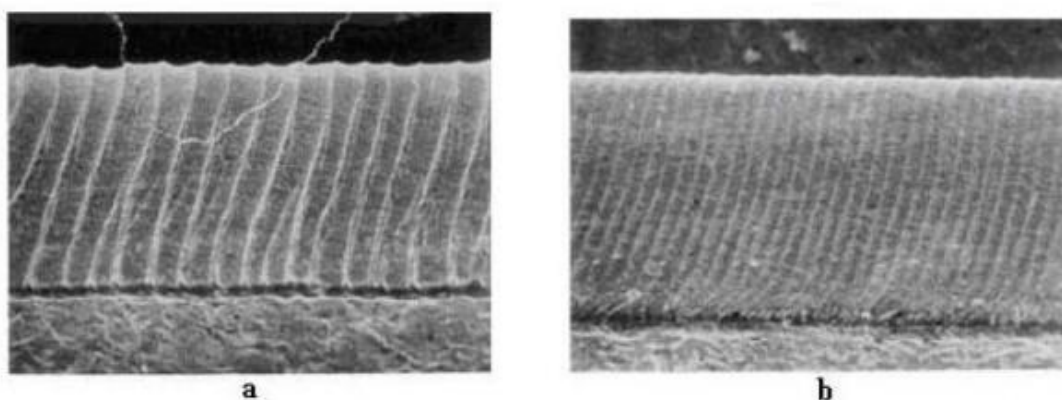
Varijantom rezanja izgaranjem koristi se dodatni izvor topline koji je nastao egzotermnom reakcijom plina za rezanje i radnog komada. Plin za rezanje je kisik ili mješavina bogata kisikom. Egzotermnom se reakcijom dodaje energija procesu rezanja pa se mogu postići i dvostruko veće brzine rezanja nego kod rezanja taljenjem. Površina reza je oksidirana, ali kod konstrukcijskih čelika taj se sloj oksida lako uklanja. Kod nehrđajućih čelika troska je viskozija (nikal se teško oksidira) pa može ostati na donjem rubu reza i teže se uklanja. Osim čelika, titan i njegove legure dobro se režu kisikom, ali rezultat je površina reza osjetljivija na pukotine. Zahtjevi za kvalitetom pri upotrebi titana su najčešće visoki, stoga ova varijanta procesa nije uvijek primjenjiva. Slika 15. prikazuje lasersko rezanje izgaranjem.



Slika 15. Postupak laserskog rezanja izgaranjem [14]

Postoji veliki broj parametara kod postupka rezanja laserom, a najvažniji su: režim rada (kontinuirani ili impulsni), brzina rezanja, vrsta i tlak plina za rezanje, promjer žarišta, položaj žarišta u odnosu na sapnicu te udaljenost sapnice od radnog komada .

Prosječna snaga u kontinuiranom načinu rada te vršna snaga u impulsnom rezanju određuju penetraciju. Laserska zraka kao kontinuirani val visoke snage koristi se kod debljih sekcija jer se mogu postići veće brzine rezanja s većom prosječnom snagom. Međutim, ispuhivanje taline ili isparenog materijala nije dovoljno učinkovito što utječe na kvalitetu reza. S druge strane, impulsne zrake niže energije primjenjuju se za precizna rezanja. Visoka vršna snaga u kratkim intervalima omogućava potrebno zagrijavanje, dok niža prosječna snaga omogućuje sporije odvijanje procesa te efektivnije ispuhivanje rastaljeno/isparenog materijala uz ostvarivanje bolje kvalitete reza. Slikom 16. prikazana je usporedba rezova kontinuiranim i impulsnim postupkom.



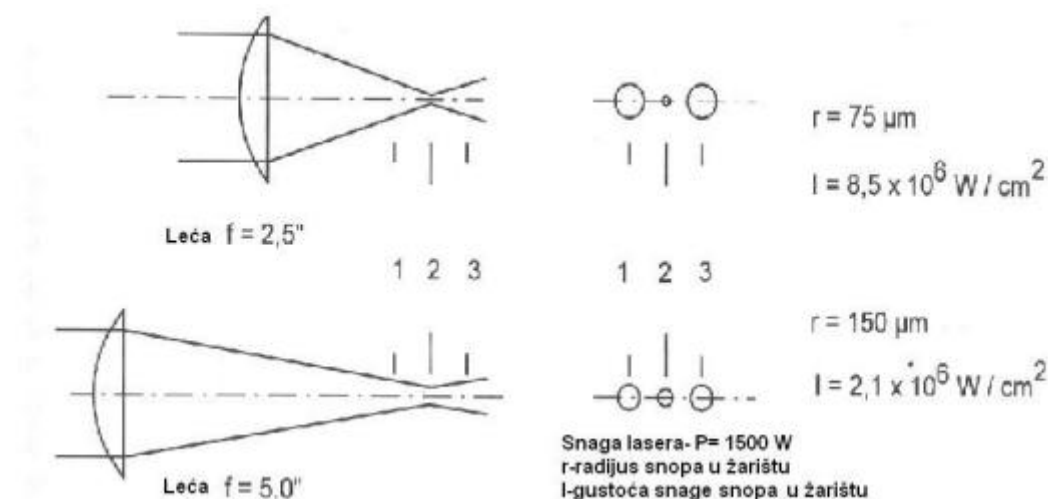
Slika 16. Usporedba reznih površina izvedenih kontinuiranim (a) i impulsnim (b) postupkom [14]

Brzina rezanja najviše ovisi o vrsti i debljini materijala kao i o snazi dostupnog lasera. Brzine rezanja obično iznose od 0,5 m/min pa do oko 10 m/min kod rezanja vrlo tankih materijala. Cilj je dobiti što bolju kvalitetu površine reza sa što većom brzinom rezanja. Brzine rezanja moraju biti usklađene s protokom plina i snagom lasera. Kod korištenja kisika, niske brzine rezanja rezultiraju povećanim gorenjem na rubovima reza što umanjuje kvalitetu reza te povećava zonu utjecaja topline. Brzine rezanja određuju se eksperimentalno, a počinje se od preporuke proizvođača.

Kao što je već navedeno plinovi za rezanje imaju funkciju zaštite žarišne optike od štrcanja. Uz tu funkciju, određeni plinovi imaju dodatne funkcije. Gotovo inertan plin, dušik, ispuhuje

rastaljeni materijal nedopuštajući kapljicama da otvrdnu s donje strane reza (srh), dok aktivni plin, poput kisika, sudjeluje u egzotermnoj reakciji s materijalom. Plin također sprječava da se formira plazma kad se režu deblje pozicije jakim intenzitetom. Rub reza se hladi protokom plina što umanjuje zonu utjecaja topline. Izbor plina ima značajan utjecaj na produktivnost i kvalitetu procesa rezanja. Najčešći plinovi koji se koriste su kisik i dušik. Dušik se uobičajno koristi kod rezanja nehrđajućih čelika, visokolegiranih čelika, aluminija te nikla. Kisik se koristi za rezanje mekih i niskolegiranih čelika. Inertni plinovi (argon i helij) primjenu imaju pri rezanju titana jer sprječavaju formiranje oksida i titanovih nitrida. [15]

Zarišna duljina leće f definira promjer žarišta. Leća s kraćom žarišnom duljinom fokusira snop na manji promjer žarišta, što daje veću gustoću snage. Usporedba dviju leća različite žarišne duljine prikazana je na slici 17. Prikazane su vrijednosti gustoće snage te promjeri žarišta za obje leće korištenjem lasera iste snage.



Slika 17. Usporedba leća žarišnih duljina f od 2,5 i 5 inča (63,5 i 127 mm) [13]

Održavanje propisanog položaja žarišta i razmaka sapnice imaju kod rezanja laserom vrlo važnu ulogu. Svaki pomak od namještene vrijednosti odražava se na pogoršanje kvalitete reza. Stoga se koriste senzori za kontrolu položaja žarišta, odnosno udaljenosti sapnice od radnog komada.

6. ZAVARIVANJE – NEPRAVILNOSTI REZOVA PRI PLINSKOM REZANJU, REZANJU LASERSKIM SNOPOM I REZANJU PLAZMOM – NAZIVLJE (ISO 17658:2002; EN ISO 17658:2015)

3.1. Područje primjene

Ova međunarodna norma definira pojmove mogućih nepravilnosti prilikom plinskog rezanja, rezanja plazmom i laserskog rezanja. U normi su prikazani i klasificirani tipovi grešaka.. Nepravilnosti reza su nesavršenosti određenih geometrijskih značajki te dijelova reza. U ovoj se normi nalaze samo nepravilnosti koje se pojavljuju pri plinskom, laserskom te rezanju plazmom. Sve ostale nepravilnosti, koje su rezultirane vanjskim utjecajima te naprezanjem, nisu opisane. Klasifikacija je provedena uzimajući u obzir vrstu, oblik te položaj nepravilnosti unutar reza dok uvjeti i uzroci navedenih nisu dani. Podaci o uzrocima i posljedicama nepravilnosti nisu navedeni zato što oni uvelike ovise o konkretnom slučaju rezanja. Uslijed rezanja može doći do istovremene pojave dvije ili više vrsta grešaka. Klasifikacija grešaka u skupine nije mjerilo njihove važnosti odnosno težine.

Slijedeći dokument norme sadrži odredbe koje su potkrijepljene referencama u tekstu, uključujući i odredbe ove međunarodne norme:

ISO 9013, Toplinsko rezanje – Razradba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće

Nepravilnosti su klasificirane u 5 grupa:

- nepravilnosti na rubovima reza
- nepravilnosti na površini reza
- troska
- pukotine
- ostale nepravilnosti.

3.2. Nepravilnosti na rubovima reza

Nepravilnosti na rubovima reza su oštećenja koja su nastala kao posljedica taljenja ruba ili gubitka materijala s područja ruba. Nepravilnosti koje su opisane su: zaobljenje gornjeg i donjeg ruba reza, niz očvrnutih kapljica na gornjem i donjem rubu reza, prevjes gornjeg ruba reza te rastaljeni gornji rub reza.

Prva u nizu nepravilnosti u ovoj grupi je zaobljenje ruba reza. Ovu pojavu karakterizira taljenje ruba reza koje se može pojaviti na gornjem ili donjem rubu reza. Na Slici 18. prikazana su oba slučaja.



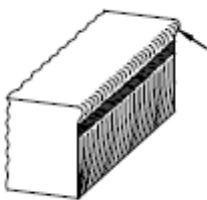
Slika 18. Zaobljenje gornjeg i donjeg ruba reza [16]

Iduća pojava koja se pojavljuje je niz očvrnutih kaplica. Identično prethodnoj pojavi, ova nepravilnost se može pojaviti i na gornjem i na donjem rubu reza. Slikom 19. prikazana su oba slučaja ove pojave.



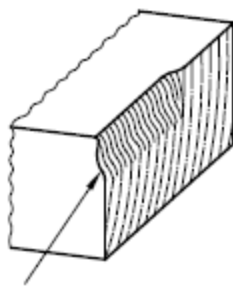
Slika 19. Niz očvrnutih kaplica na gornjem i donjem rubu reza [16]

Prevjes gornjeg ruba reza karakterizira gornji rub reza koji „visi“ iznad površine reza. Slikom 20. prikazana je ova nepravilnost.



Slika 20. Prevjes gornjeg ruba reza [16]

Rastaljeni gornji rub reza karakterizira gubitak materijala s gornjeg ruba reza. Na Slici 21. prikazana je ova nepravilnost.



Slika 21. Rastaljeni gornji rub reza [16]

3.3. Nepravilnosti površine reza

Nepravilnosti površine reza su odstupanja od zahtijevanog profila reza. Dije se na: geometrijske nepravilnosti, nepravilnosti reznih linija, izdubljenja, nedovršenost kraja reza te neparalelnost površine reza. Određene skupine nepravilnosti imaju podskupine.

Geometrijske se nepravilnosti odnose na odstupanja kuta ili okomitosti. Dije se na: konkavnost površine uz rub reza, proširenje reza, odstupanje kuta reza, konkavnost površine reza te odstupanje profila površine reza.

Konkavnost površine uz rub reza je pojava vodoravnog žlijeba u blizini gornjeg ili donjeg ruba reza. Slikom 22. dan je prikaz ove nepravilnosti.



Slika 22. Konkavnost površine uz rub reza [16]

Proširenje reza karakterizira povećanje širine reza na jednu ili obje rezne površine. Postoje varijante proširenja reza na vrhu i dnu radnog komada. Slikom 23. prikazane su varijante proširenja reza.



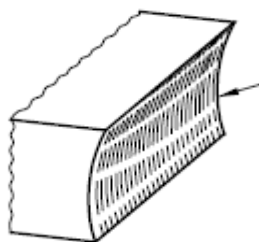
Slika 23. Proširenje reza [16]

Odstupanje kuta reza je nepravilnost kuta nagiba α od propisane vrijednosti, uz jednoliku širinu reza. Moguća je pojava ove nepravilnosti s jedne ili obje strane rezne površine. Odstupanje kuta reza prikazano je Slikom 24.



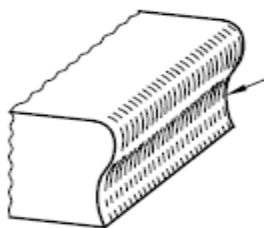
Slika 24. Odstupanje kuta reza [16]

Konkavnost površine reza karakterizira udubljena površina reza uzduž cijelog reza. Slika 25. prikazuje ovu nepravilnost.



Slika 25. Konkavnost površine reza [16]

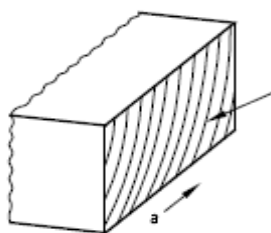
Odstupanje profila površine reza definira valovita površina reza u smjeru debljine reza. Slika 26. prikazuje ovu nepravilnost.



Slika 26. Odstupanje profila površine reza [16]

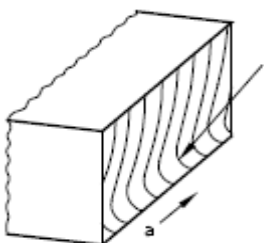
Nepravilnosti reznih linija karakterizira odstupanje nagiba reznih linija. Dije se na: rezne linije usmjerene suprotno od smjera rezanja, zaostajanje dijela rezne linije, lokalne nepravilnosti reznih linija, prevelika dubina reznih linija te nepravilnosti dubine reznih linija.

Rezne linije usmjerene suprotno od smjera rezanja je nepravilnost gdje dolazi do prekomjernog usmjeravanja reznih linija u smjeru suprotnom od smjera rezanja (a). Slikom 27. prikazana je ova nepravilnost.



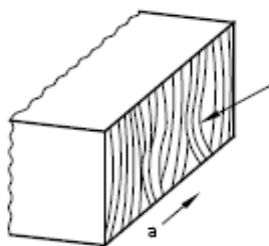
Slika 27. Rezne linije usmjerene suprotno od smjera rezanja [16]

Zaostajanje dijela rezne linije karakterizira izražen kut podrezivanja rezne linije. Slika 28. prikazuje ovu nepravilnost s označenim smjerom rezanja (a).



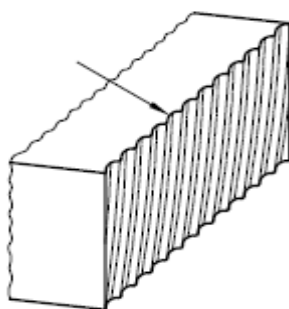
Slika 28. Zaostajanje dijela rezne linije [16]

Lokalne nepravilnosti reznih linija karakterizira naglašeno odstupanje reznih linija u smjeru rezanja (a) i/ili smjeru suprotnom od smjera rezanja. Ova nepravilnost prikazana je slikom 29.



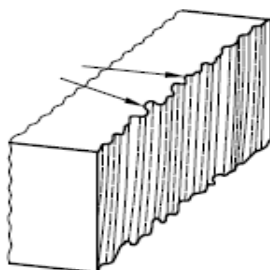
Slika 29. Lokalne nepravilnosti reznih linija [16]

Prevelika dubina reznih linija karakterizirana je prevelikim usijecanjem pojedinih reznih linija u obradak. Slikom 30. prikazana je ova nepravilnost.



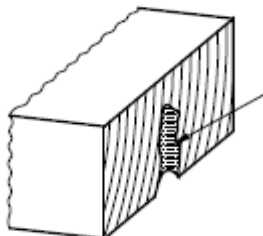
Slika 30. Prevelika dubina reznih linija [16]

Nepravilnosti dubine reznih linija predstavljaju neprihvatljivu nejednakost dubine reznih linija. Slikom 31. prikazana je ova nepravilnost.



Slika 31. Nepravilnosti dubine reznih linija [16]

Izdubljenja su nepravilnosti, gdje je došlo do gubitka materijala s površine reza do određene dubine, u smjeru rezanja. Potrebno je naglasiti da je dubina izdubljenja veća od dubine reznih linija, a izdubljenja mogu biti izdvojena ili grupirana. Slikom 32. prikazano je izdvojeno izdubljenje dok su slikom 33. prikazana grupirana izdubljenja po cijeloj visini reza te na donjem dijelu reza.

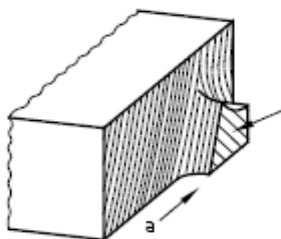


Slika 32. Izdvojeno izdubljenje [16]



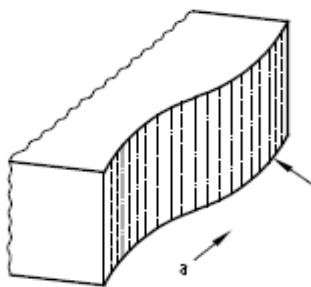
Slika 33. Grupirana izdubljenja [16]

Nedovršenost kraja reza pojavljuje se kada dođe do razdvajanja 2 komada materijala prije završetka procesa rezanja. Slikom 34. prikazana je ova nepravilnost uz smjer rezanja (a).



Slika 34. Nedovršenost kraja reza [16]

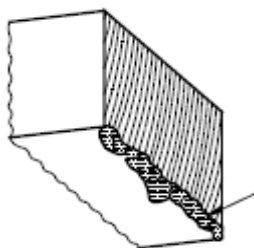
Neparalelnost površine reza je nepravilnost koju karakterizira valovitost rezne površine u smjeru rezanja (a). Slikom 35. prikazana je ova nepravilnost.



Slika 35. Neparalelnost površine reza [16]

3.4. Troska

Trosku, koja nastaje prilikom procesa rezanja, teško je ukloniti. To se posebno odnosi na trosku koja se nalazi uz donji rub reza te na površini reza (pretežno u donjem dijelu). Potrebno je naglasiti da kod rezanja tankih ploča (do 10 mm), troska može doći na obje strane ploče te se spojiti pa čak i zapuniti rez. Slikom 36. prikazana je troska na donjem rubu reza.

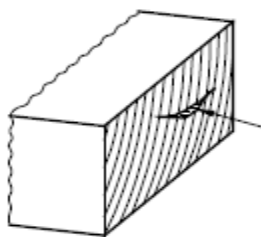


Slika 36. Troska na donjem rubu reza [16]

3.5. Pukotine

Pukotine su posljedica procesa hlađenja ili naprezanja kojima je radni komad izložen. Pukotine se dijele na mikropukotine i makropukotine.

Mikropukotine su uglavnom vidljive pod mikroskopom, dok su makropukotine vidljive golim okom. Slikom 37. prikazana je makropukotina na površini reza.

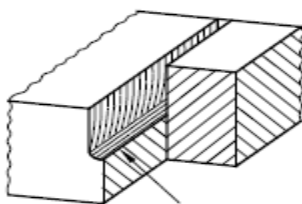


Slika 37. Makropukotina [16]

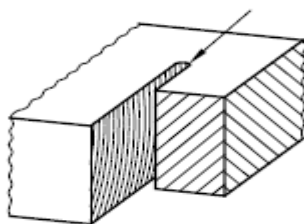
3.6. Ostale nepravilnosti

Ostale nepravilnosti koji se ne uklapaju u prethodne grupe su: nepravilnosti na početku reza, nepravilnosti ruba provrta , prevelika širina reza, nepotpun rez, spaljena površina te dimenzijska odstupanja.

Nepotpun rez se može pojaviti u smjeru rezanja ili u smjeru debljine materijala. Slikom 38. prikazan je nepotpun rez u smjeru debljine materijala, dok je slikom 39. prikazan nepotpun rez u smjeru rezanja.



Slika 38. Nepotpun rez u smjeru debljine materijala [16]



Slika 39. Nepotpun rez u smjeru rezanja [16]

Spaljena je površina rezultat prevelikog unosa topline u materijal koji uzrokuje promjenu fizikalnih svojstava materijala.

Dimenzijska odstupanja su odstupanja od vrijednosti propisanih normom HRN EN ISO 9013.

7. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalnim dijelom ovog rada određeni su parametri rezanja u cilju postizanja maksimalne brzine za rezanje plinskim plamenom te plazmom. Ispitivanje je provedeno na nelegiranom i visokolegiranom čeliku te aluminiju. Nakon rezanja ispitnih uzoraka provedena je vizualna kontrola rezova te su detektirane i analizirane nepravilnosti prema normi HRN EN ISO 17658. Uz navedeno, ispitana je hrapavost površine na uzorcima koji su rezani maksimalnom brzinom kojom se dobila zadovoljavajuća kvaliteta reza s ciljem ocjene kvalitete reza prema HRN EN ISO 9013.

4.1. Oprema za rezanje

Postupak plazma rezanja proveden je uporabom sustava za plazma rezanje koji je prikazan na slici 40., smještenom u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 40. Prikaz sustava za plazma rezanje

Za rezanje plazmom koristi se izvor za visokoprecizna toplinska rezanja, SPARCIN 900M, proizvođača SPT Plasmatechnik AB. Metali debljine od 1 do 20 mm mogu se rezati sa strujama od 20 do 120 A. Maksimalna debljina rezanja iznosi 28 mm. Plazma sustav koristi

tehničke plinove kisik, dušik, argon, vodik i njihove mješavine, što omogućuje optimalne rezultate rezanja kod svih vrsta metala. Također je moguće koristiti zrak. Izvor ima mogućnost integriranja s robotiziranim i CNC sustavima. U tablici 3. navedene su tehničke karakteristike plazma izvora, SPARCIN 900M.

Tablica 3. Tehničke karakteristike plazma izvora SPARCIN 900M

Tehnički podaci	SPARCIN 900M
Napajanje	30 ~ 50 Hz; 400 V
Osigurač	16 A spori
Nazivna snaga	12 kVA
Raspon regulacije struje rezanja	120 V; 20 – 120 A
Intermitencija	100%
Napon praznog hoda	200 V
Klasa zaštite	IP 22
Hlađenje	Voda
Klasa izolacije	F
Dimenzije D*Š*V	550*360*920 mm
Masa	28 kg

Vođenje plazma pištolja izvodi troosni CNC sustav-stol PROXIMA KOMPAKT 10/20 proizvođača VANAD. PROXIMA KOMPAKT 10/20 je portalna rezačica s dvostranim sinkroniziranim pogonom, s tri pogonska servo motora. Dvostrani sinkronizirani pogon omogućava visoku točnost rezanja, dulji vijek trajanja i vrlo malo odstupanje od idealne geometrije rezanja. Maksimalna brzina pozicioniranja i rezanja iznosi 20 m/min. Radno područje stola iznosi 1050*2200 mm. Rezolucija iznosi 0,01 mm, a točnost ponavljanja i pozicioniranja iznosi +/- 0,05 mm. Maksimalna vertikalna brzina gibanja iznosi 8 m/min. S donje strane stola nalazi se segmentni odsis plinova pomoću filterskog sustava IPERJET. [17]

Plinsko je rezanje provedeno konzolnim strojem za plinsko rezanje Uljanik OPTOTAJ 15/20. Uređaj ima ugrađene redukcijske ventile za gorivi plin, kisik za grijanje i rezanje te manometre. Stroj se pogoni parom DC servo-motora koji omogućavaju miran rad i pri najmanjim brzinama rezanja. Maksimalna brzina pozicioniranja i rezanja iznosi 1 m/min. Na slici 41. prikazan je sustav za plinsko rezanje u Laboratoriju za zavarivanje. [18]



Slika 41. Sustav za plinsko rezanje Uljanik OPTOTAJ 15/20

4.2. Materijal

Nelegirani čelik koji je korišten za ispitivanje je S235 dok je nehrđajući čelik koji je upotrebljen AISI 304. Aluminij na kojem je izveden eksperiment je Al legura 5083. Debljina svih ispitnih uzoraka iznosi 10 mm. Tablicama 4., 5. i 6. naveden je kemijski sastav materijala korištenih u eksperimentu.

Tablica 4. Kemijski sastav čelika S235 [19]

Materijal	% C	% Mn	% P	% S
S235	≤ 0,22	≤ 1,60	≤ 0,05	≤ 0,05

Tablica 5. Kemijski sastav nehrđajućeg čelika AISI 304 [20]

Materijal	% C	% Cr	% Mn	% Ni	% P	% S	% Si
AISI 304	≤ 0,08	18 - 20	≤ 2	8 - 10,5	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 1

Tablica 6. Kemijski sastav Al 5083 [21]

Materijal	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ti	% Cr
Al 5083	0,4	0,4	0,1	0,4 - 1	4 - 4,9	0,25	0,15	0,05 - 0,25

4.3. Plan pokusa

U cilju određivanja kvalitete reza za odabrane materijale, određeno je da se pri rezanju plazmom varira brzinom rezanja te veličinom jakosti struje. Rezanje plazmom je obavljeno na nehrđajućem čeliku i aluminiju. Pri plinskom rezanju mijenjane su brzine rezanja. Nelegirani čelik je rezan plinskim postupkom. Nakon obavljenog rezanja detektirane su nepravilnosti prema normi HRN EN ISO 17658. Nadalje analizirana je kvaliteta hrapavosti površine reza za rezove za koje je prethodno vizualno određeno da zadovoljavaju izgledom, a ostvareni su najvećom brzinom.

4.3.1. Plazma rezanje nehrđajućeg čelika AISI 304

Prema planu pokusa, uzorci su rezani različitim brzinama rezanja te različitim vrijednostima jakosti struje. Ostali parametri procesa rezanja su konstantni. Tablica 7. prikazuje parametre rezanja čelika AISI 304 zrakom kao plazmenim plinom.










Tablica 7. Parametri rezanja nehrđajućeg čelika AISI 304

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ , mm	v , m/min	Udaljenost sapnice od radnog komada, mm	Struja rezanja, A
1.	Zrak	1,1	0,12	3	50
2.			0,24		
3.			0,34		
4.			0,34	3	65
5.			0,46		
6.			0,56		
7.			0,56	3	80
8.			0,64		
9.			0,74		

Prilikom rezanja čelika plazmom svim brzinama i jakostima struje navedenima u tablici 7. došlo je do potpunog rezanja materijala. Međutim, kvaliteta reza se uvelike razlikovala ovisno o brzini rezanja u skupinama gdje je korištena određena vrijednost jakosti struje. U tablici 8.

prikazani su izrezani uzorci kako bi se već na početku eksperimenta vidio utjecaj promjene brzine rezanja i jakosti struje na dobivenu površinu reza.

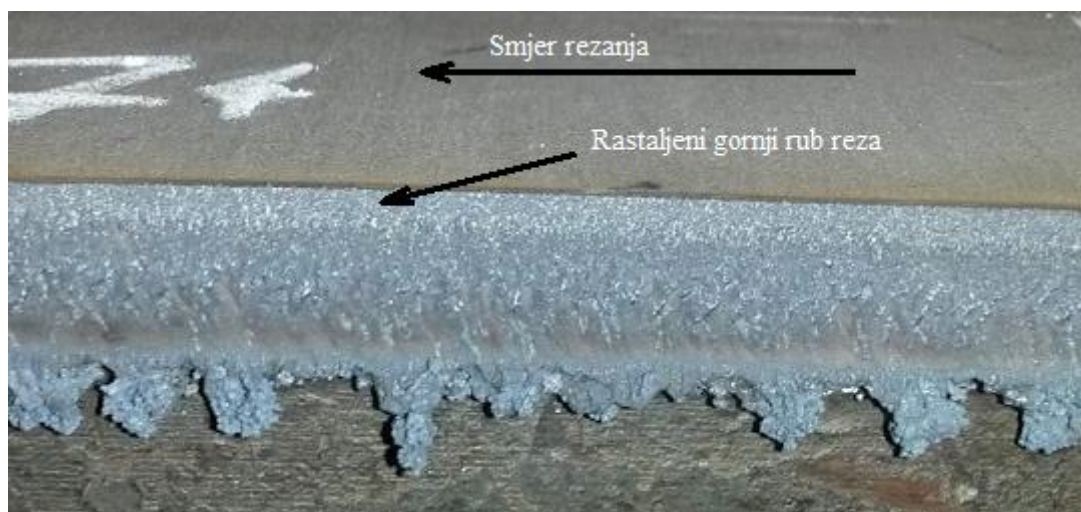
Tablica 8. Izgled rezova u ovisnosti o brzini rezanja i jakosti struje

Uzorak	v , m/min	Jakost struje, A	Smjer rezanja ←
1.	0,12	50	
2.	0,24		
3.	0,34		
4.	0,34	65	
5.	0,46		
6.	0,56		
7.	0,56	80	
8.	0,64		
9.	0,74		

Pri svim primjenjenim jakostima struje došlo je do pojave istog tipa grešaka kada je brzina rezanja bila prevelika. Povećanjem jakosti struje moguće je ostvariti veće brzine rezanja kojima se ostvaruje kvalitetan rez. To je prije svega vidljivo na uzorcima 3 i 4 gdje je rezanjem istim brzinama, ali različitim strujama, kvaliteta reza uzorka 4. mnogo bolja. Zadatak ovog rada je bio odrediti maksimalnu brzinu kojom se postiže zadovoljavajuća kvaliteta reza. Prema tome, maksimalna brzina rezanja iznosi 0,56 m/min pri jakosti struje od 80 A kojom je rezan uzorak 7. Najuočljivije nepravilnosti, opisane normom HRN EN ISO 17658, koje su se pojavile prilikom rezanja su: pojava troske na donjem rubu reza te rezne linije usmjereno suprotno od smjera rezanja. Troska se pojavila pri rezanju prevelikim brzinama, a ova je nepravilnost izraženija kod rezanja strujom veće jakosti. S druge strane nepravilnost usmjerenosti linija rezanja u smjeru suprotnom od smjera rezanja je znatno izraženija pri manjim jakostima struje. Uz prethodno navedene, pojavila se i nepravilnost rastaljenog gornjeg ruba reza koja je uočljivija na uzorku 9. Na ostalim uzorcima nije došlo do pojave te greške. Slikama 42. i 43. prikazani su uzorci gdje su najbolje vidljive navedene greške.



Slika 42. Nepravilnosti reza na uzorku 3



Slika 43. Rastaljen gornji rub reza na uzorku 9

4.3.2. Plazma rezanje Al legure 5083

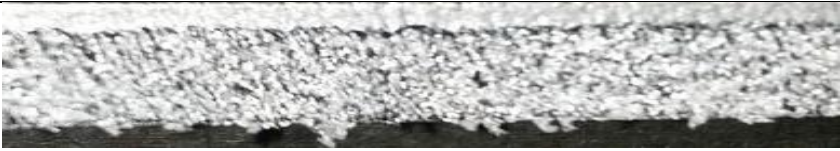


Kao i u slučaju nehrđajućeg čelika, uzorci su rezani različitim brzinama te različitim vrijednostima jakosti struje. Brzine rezanje su veće nego kod rezanja nehrđajućeg čelika dok su jakosti struje jednake. Ostali parametri procesa rezanja su konstantni. Tablica 9. prikazuje parametre rezanja Al legure 5083 zrakom kao plazmenim plinom.

Tablica 9. Parametri rezanja Al legure 5083

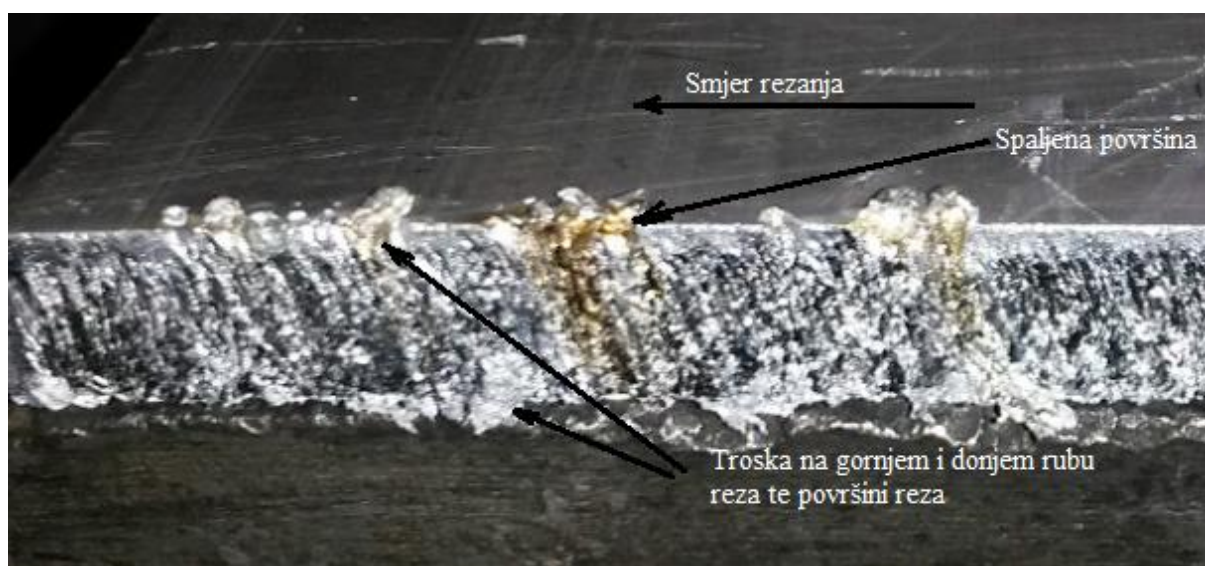
Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ , mm	Brzina rezanja, m/min	Udaljenost sapnice od radnog komada, mm	Struja rezanja, A
10.	Zrak	1,1	0,46	3	50
11.			0,56		
12.			0,84		
13.			1,02	3	80
14.			0,76		
15.			1,20		
16.			1,40		
17.			1,70		

U tablici 10. prikazani su izrezani uzorci aluminija na kojima se vidi razlika u rezovima ovisno o primjenjenoj jakosti struje te brzini rezanja.

Tablica 10. Izgled rezova u ovisnosti o brzini rezanja i jakosti struje

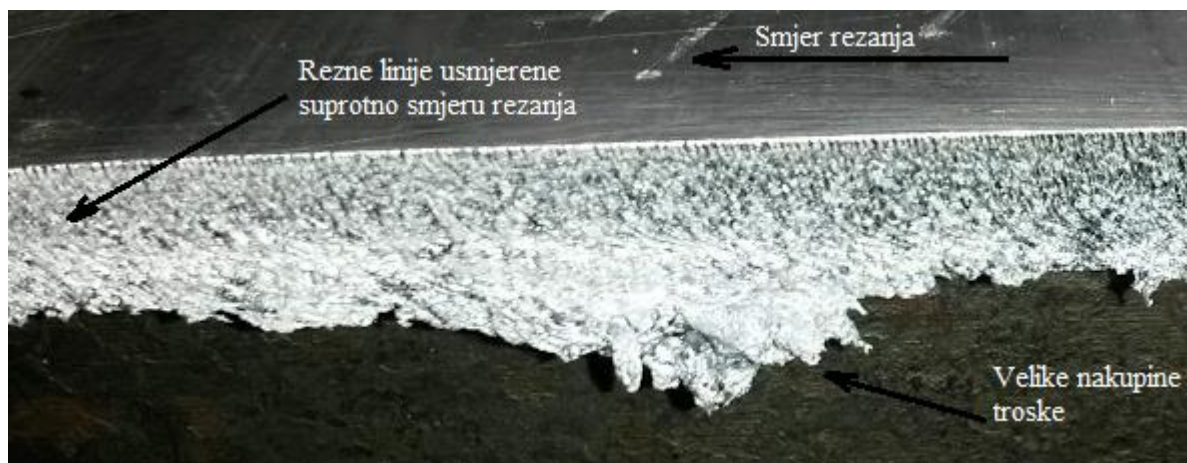
Uzorak	v , m/min	Jakost struje, A	Smjer rezanja ←
10.	0,46	50	
11.	0,56		
12.	0,84	65	
13.	1,02		
14.	0,76	80	
15.	1,20		
16.	1,40		
17.	1,70		

Pri plazma rezanju aluminija premalim brzinama došlo je do pojave velikog broja nepravilnosti. To je najuočljivije na uzorku 14. koji je rezan brzinom 0,76 m/min pri jakosti struje 80 A. Došlo je do pojave troske na donjem i gornjem rubu reza te na površini reza. Zbog relativno male debljine radnog komada troska se pojavila i na gornjem rubu reza. Pri rezanju materijala veće debljine do pojave troske na gornjem rubu reza vjerojatno ne bi došlo. Površina reza je izuzetno hrapava. Zbog prevelikog unosa topline u radni komad na pojedinim dijelovima je došlo i do pojave spaljene površine reza. Slika 44. prikazuje navedene nepravilnosti na uzorku 14.



Slika 44. Nepravilnosti reza na uzorku 14

Na uzorcima koji su rezani prevelikom brzinom pojavila se troska te usmjerenost rezne linije suprotno od smjera rezanja. Uzorak na kojem se navedene nepravilnosti najbolje vide je uzorak 17. Na uzorku se pojavila velika količina troske na donjem rubu i površini reza koju je teško ukloniti. Rezne su linije u velikoj mjeri usmjerene suprotno od smjera rezanja. Slikom 45. prikazane su navedene nepravilnosti. Kao i u slučaju rezanja nehrđajućeg čelika, maksimalna je brzina ostvarena pri jakosti struje od 80 A. Maksimalna brzina rezanja kod koje je procijenjeno da je kvaliteta reza zadovoljavajuća iznosi 1,20 m/min i postignuta je na uzorku 15.



Slika 45. Nepravilnosti reza na uzorku 15

4.3.3. Plinsko rezanje čelika S235


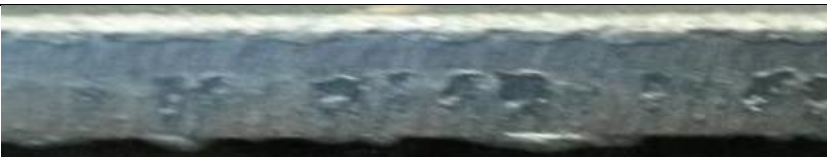


Plinsko rezanje čelika S235 provedeno je uporabom acetilena kao gorivog plina. Tlak acetilena je tokom cijelog procesa rezanja bio 0,45 bar, dok su tlakovi kisika iznosili 2 bar (kisik za zagrijavanje) te 2,5 bar (kisik za izgaranje). Tlakovi kisika su također bili konstantni tijekom procesa rezanja. Brzina rezanja je jedini parametar procesa koji je mijenjan tijekom procesa rezanja. U tablici 11. navedeni su parametri rezanja čelika plinskim postupkom. Došlo je do potpunog rezanja svih ispitnih uzoraka. Uzorci nisu predgrijavani prije rezanja. Izvršeno je čišćenje materijala kako bi se s površine uklonile razne nečistoće i oksidi.

Tablica 11. Parametri plinskog rezanja čelika S235

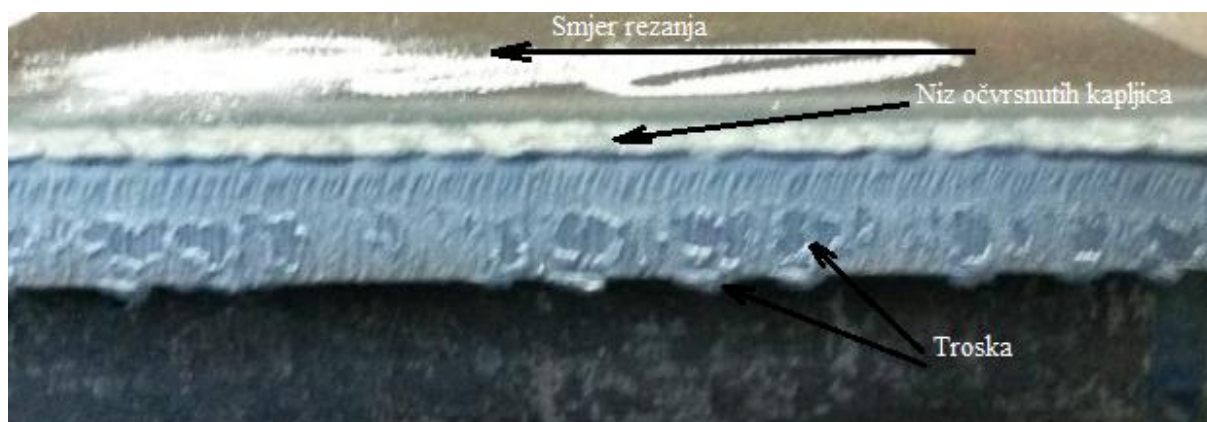
Uzorak	Brzina rezanja (m/min)
18.	0,3
19.	0,4
20.	0,7
21.	0,9

U tablici 12. prikazani su rezovi čelika na kojima se vidi razlika u rezovima ovisno o brzini rezanja.

Tablica 12. Izgled rezova u ovisnosti o brzini rezanja

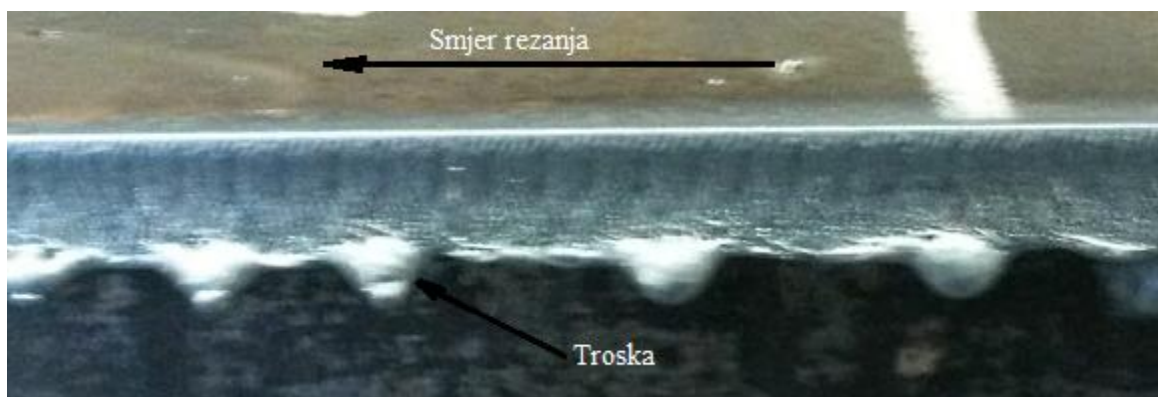
Uzorak	v (m/min)	Smjer rezanja ←
18.	0,3	
19.	0,4	
20.	0,7	
21.	0,9	

Na uzorcima 18. i 19., koji su rezani premalom brzinom, došlo je do pojave troske na donjem rubu reza te u središnjem dijelu površine reza. Na gornjem rubu reza pojavio se niz očvrnutih kapljica. Maksimalna brzina kojom je ostvaren kvalitetan rez iznosi 0,7 m/min za uzorak 20. Slikom 46. prikazane su nepravilnosti reza na uzorku 18.



Slika 46. Nepravilnosti reza na uzorku 18

Na uzorku 21. koji je rezan prevelikom brzinom došlo je do pojave velikih nakupina troske na donjem rubu reza. Slika 47. prikazuje uočenu nepravilnost



Slika 47. Nepravilnosti reza na uzorku 21

4.4. Ukratko o normi HRN EN ISO 9013

Norma pod nazivom „Toplinsko rezanje – Razredba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće“ vrijedi za sve vrste toplinskog rezanja materijala, a njihove rezove klasificira prema dozvoljenim odstupanjima kakvoće.

Ova norma uključuje geometrijsku specifikaciju proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće. Geometrijske specifikacije proizvoda su primjenjive ako je napravljena referenca prema normi HRN EN ISO 9013 u crtežima ili relevantnim dokumentima. Sljedeći dokumenti norme sadrže odredbe koje su potkrijepljene referencama u tekstu, uključujući i odredbe ovih normi:

ISO 1302:2002 Geometrijske specifikacije proizvoda - Oznaka sastava površine u tehničkoj dokumentaciji

ISO 2553:1992 Zavareni, lemljeni spojevi – Prikazivanje simbolima na crtežima

ISO 3274:1996 Geometrijske specifikacije proizvoda – Struktura površine: Metoda profila - Nominalne karakteristike dodirnih uređaja

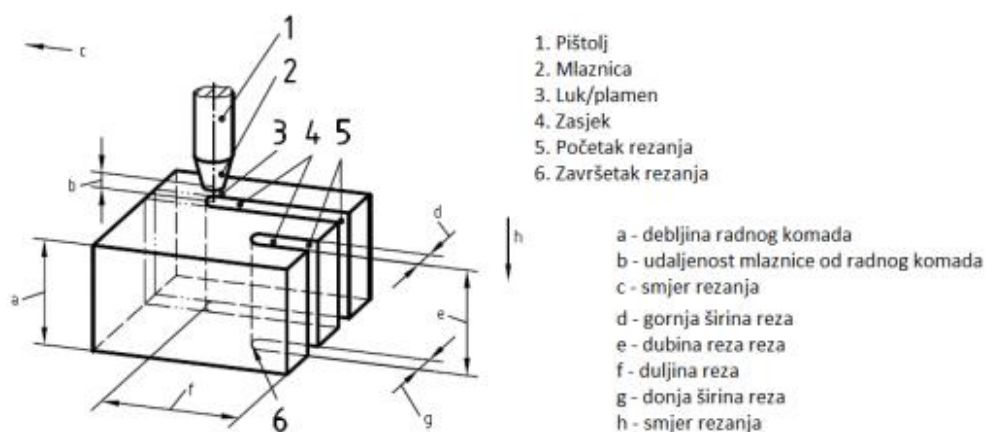
ISO 4287:1997 Geometrijske specifikacije proizvoda – Tekstura površine: Metoda profila – Oznake, definicije i parametri teksture površine

ISO 4288:1996 Geometrijske specifikacije proizvoda – Tekstura površine: Metoda profila – Pravila i procedure za procjenu teksture površine

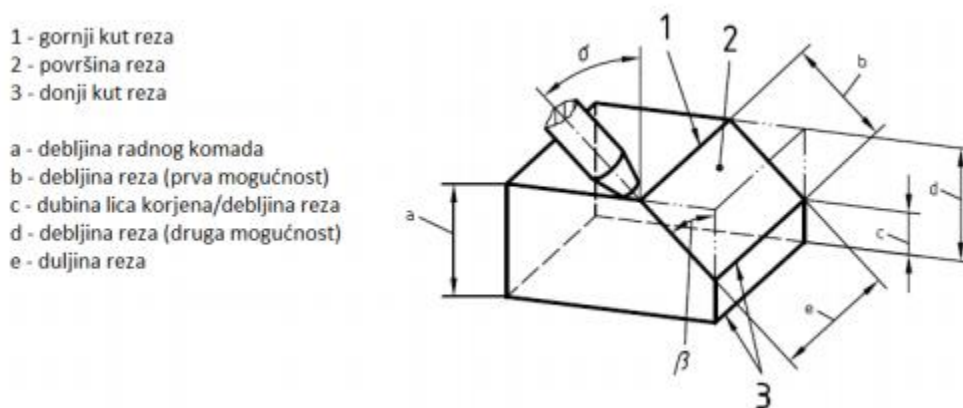
Ova se norma odnosi na materijale pogodne za plinsko rezanje, plazma rezanje i rezanje laserom. Kod plinskog rezanja koristi se za rezove od 3 mm do 300 mm, za plazma rezove od 1 mm do 150 mm te za laser rezove od 0,5 mm do 40 mm.

4.4.1. Oznake i definicije objašnjene slikama

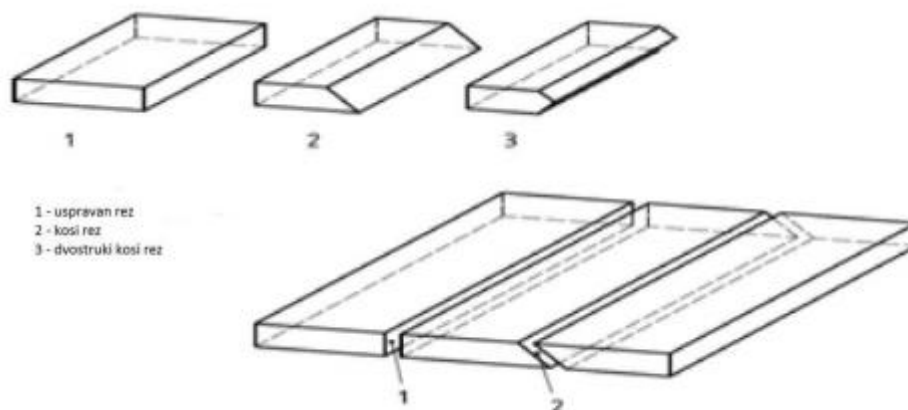
Slika 48. prikazuje dijelove radnog komada i opreme u tijeku procesa rezanja. Slika 49. prikazuje pojmove gotovog izrezanog radnog komada dok slika 50. prikazuje moguće rezove površine reznog komada.



Slika 48. Proces rezanja radnog komada [22]



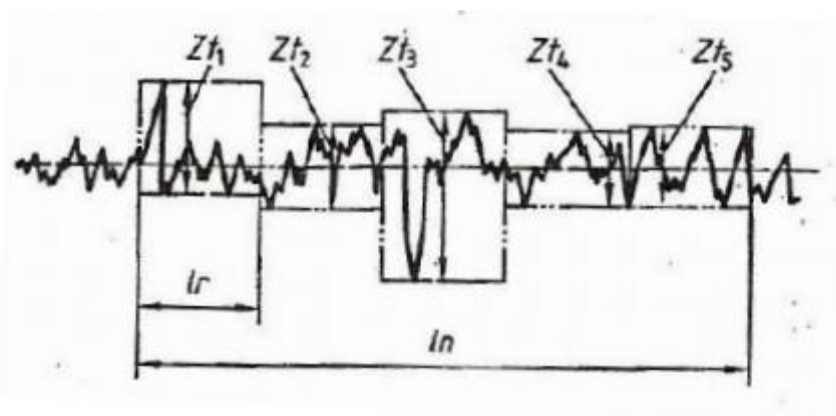
Slika 49. Radni komad po završetku rezanja [22]



Slika 50. Moguće vrste rezova [22]

4.4.2. Prosječna visina neravnina

Aritmetička sredina od pet pojedinačnih izmjerenih udaljenosti profila se označava oznakom Rz_5 . Indeks 5 u Rz_5 dodan je kako bi se istaknula aritmetička sredina i maksimalna visina profila od pet pojedinačnih elemenata.



Gdje su:

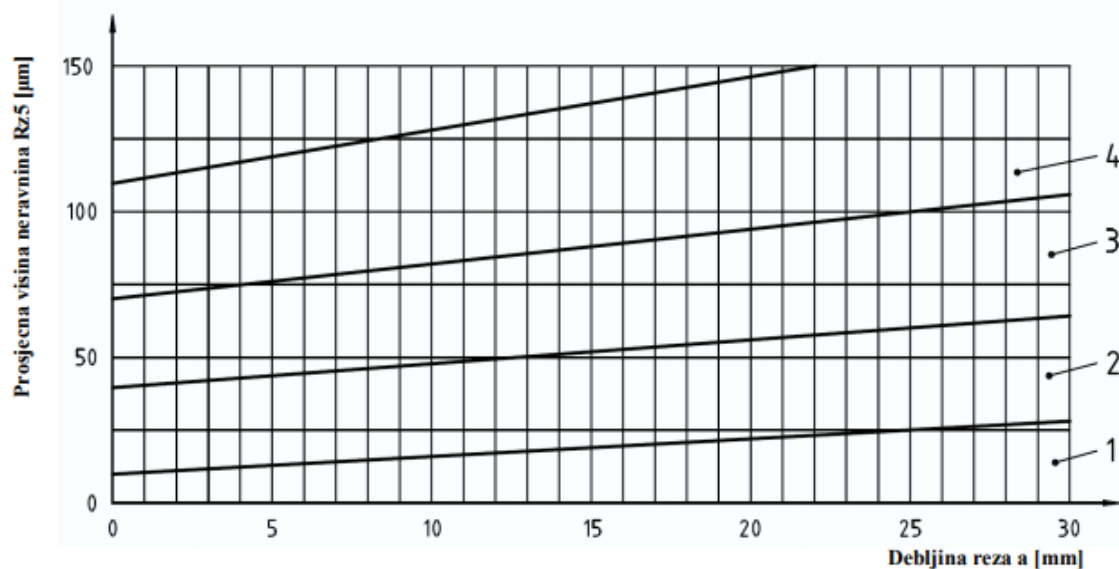
$Zt1 - Zt5$ – pojedinačne visine profila

ln – duljina vrednovanja

lr – pojedinačna duljina uzorka profila hrapavosti (1/5)

Slika 51. Prosječna visina neravnina [22]

Slikom 52. prikazane su klase kvalitete površine reza ovisno o vrijednosti prosječne visine hrapavosti za radne komade debljine do 30 mm.



Slika 52. Tolerancije hrapavosti, radni komad do 30 mm [22]

4.4.3. Kvaliteta površine reza

Kvaliteta površina reza toplinski obradljivih reznih materijala opisana je slijedećim karakterističnim vrijednostima:

jj) tolerancija okomitosti ili kutnosti, u

kk) prosječna visina neravnina, R_{Z5}

Mogu se također koristiti slijedeće karakteristične vrijednosti:

ll) rezna linija, n

mm) taljivi gornji rub, r

nn) mogući nastanak troske ili taljivih kapljica na donjem rubu reza

U ovom radu provest će se procjena kvalitete reza prema vrijednosti prosječne visine neravnina R_{Z5} .

Dopuštena odstupanja u kvaliteti površine reza tretiraju se posebno od dopuštenih dimenzijskih odstupanja radnog komada kako bi se naglasili različiti utjecaji na radni komad. Mjerenje odstupanja u kvaliteti površine reza vrši se na površini očišćenoj metalnom četkom od kapljica metalnih oksida i ostalih nečistoća. Kao referentni elementi uzimaju se gornja i donja strana toplinski izrezanog radnog komada.

4.4.4. Točke mjerenja

Broj i mjesto mjerne točke ovisi o obliku i veličini radnog komada te bi trebale biti određene od strane operatera.

Ako zahtjevima broj mjerenja nije određen, treba voditi brigu o sljedećem:

R_{Z5} - jedanput jedno mjerenje svaki metar reza

4.5. Mjerenje hrapavosti uređajem s ticalom

Hrapavost površine je u općem smislu mikrogeometrijska nepravilnost površine koja nastaje tijekom postupaka obrade ili kao posljedica drugih utjecaja poput otapanja nakon izlaganja u aktivnom mediju. Hrapavost površine bitno utječe na svojstva materijala. Hrapavost uključuje kratkovalne nepravilnosti površine. Općenito je posljedica proizvodnog procesa. Prouzrokovana je metodom obrade, odnosno rezultat je postupka obrade površine, a ne stroja. Kod uređaja s ticalom, igla ticala pomiče se konstantnom brzinom po površini i vertikalni pomak igle pretvara u električni signal pomoću pretvornika. Električni je signal pojačan i obrađen pomoću računala. Skeniranjem od točke do točke, dobiva se kvantitativna informacija s obzirom na poziciju igle ticala. Uređajima s ticalom ostvaruju se vrlo precizna mjerenja, kako u laboratorijskim, tako i u industrijskim uvjetima s vertikalnim rasponom od nekoliko milimetara, s rezolucijom u nanometrima te s mogućnošću uzdužnog skeniranja preko 100 m.

U Laboratoriju za precizna mjerenja duljina (LFSB) ispitivan je parametar R_z na uređaju za ispitivanje hrapavosti površine Surtronic 25. Uređaj je prikazan na slici 50. dok su njegove karakteristike dane u tablici 13.

Tablica 13. Karakteristike uređaja za mjerenje hrapavosti

Elektronično mehanički uređaj za ispitivanje hrapavosti površine	Surtronic 25
Proizvođač	Taylor Hobson
Serijski broj	Mu 58 - 549



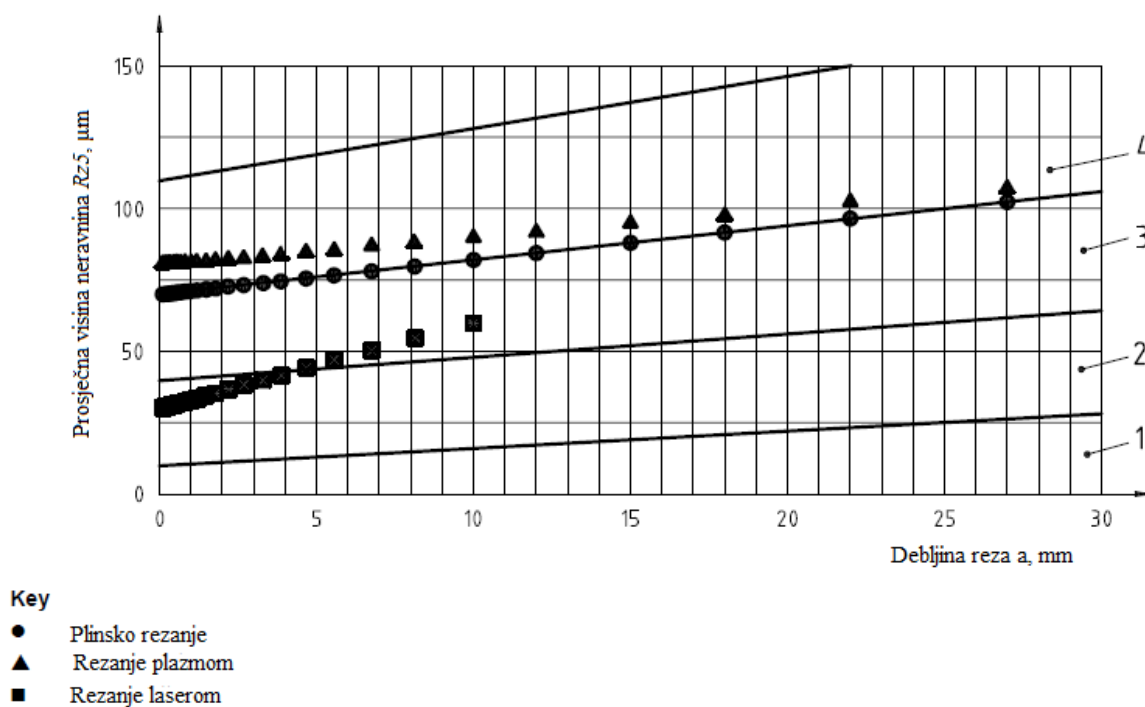
Slika 53. Uređaj za mjerenje hrapavosti SURTRONIC 25

Mjerenje hrapavosti je obavljeno na uzorcima koji su bili zadovoljavajuće kvalitete, a ostvareni su maksimalnim brzinama pri kojima je ta kvaliteta postignuta. To su uzorci 7, 15 i 20. Obavljena su po tri mjerenja na svakom rezu te su nakon toga određene srednje vrijednosti veličine hrapavosti površine (X), standardne devijacije (S), rasponi (R) te minimumi i maksimumi izmjerenih veličina. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 14.

Tablica 14. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza

Uzorak broj 7 (AISI 304, debljina = 10 mm, brzina rezanja = 0,56 m/min)					
Veličina hrapavosti (μm)	X- srednja vrijednost	s- strandardna devijacija	R-raspon	Max	Min
R_z	127	26,55	61	164	103
Uzorak broj 15 (Al 5083, debljina = 10 mm, brzina rezanja = 1,20 m/min)					
Veličina hrapavosti (μm)	X- srednja vrijednost	s- strandardna devijacija	R-raspon	Max	Min
R_z	65	19,44	45	92	47
Uzorak broj 20 (S235, debljina = 10 mm, brzina rezanja = 0,70 m/min)					
Veličina hrapavosti (μm)	X- srednja vrijednost	s- strandardna devijacija	R-raspon	Max	Min
R_z	91,67	13,10	37	106	69

Prema normi HRN EN ISO 9013 klasificirana je hrapavost površine, odnosno prosječna visina neravnina – R_z . Iz danih rezultata prosječnih visina neravnina uzoraka vidi se da uzorak nehrđajućeg čelika AISI 304 pripada gornjem dijelu klase 4, Al legura 5083 sredini klase 2 te čelik S235 donjem dijelu klase 3. Na slici 51. prikazane su vrijednosti hrapavosti površine reza koje se uobičajno postižu pojedinim postupkom toplinskog rezanja do debljine materijala 30 mm.



Slika 54. Uobičajna kvaliteta reza za pojedine postupke rezanja [19]

Usporedbom dobivenih rezultata prosječne visine neravnine R_z dobivene plazma rezanjem te plinskim rezanjem sa uobičajnom postizivom kvalitetom reza prikazanom slikom 51. zaključuje se:

- plinskim rezanjem čelika S235 dobivena je malo lošija kvaliteta reza od prosjeka vrijednosti
- plazma rezanjem Al legure 5083 ostvarena je bolja kvaliteta reza od uobičajnih vrijednosti
- plazma rezanjem nehrđajućeg čelika postignuta je lošija kvaliteta reza od očekivane.

Iz dobivenih rezultata eksperimentalnog rada vidljivo je da su parametri plazma rezanja za aluminij bili vrlo dobri jer se dobila iznimna kvaliteta reza koja je bolja od očekivane. S druge strane parametri plazma rezanja nehrđajućeg čelika nisu bili idealni jer nije postignuta

očekivana kvaliteta. Budući da su mnogi parametri procesa plazma rezanja bili konstantni, postoji velika mogućnost utjecaja na poboljšanje kvalitete reza. To se prije svega odnosi na vrstu i kombinaciju plazmenih plinova koji velikim dijelom utječu na kvalitetu reza. Plinskim rezanjem čelika S235 dobiveni su zadovoljavajući rezultati kvalitete reza stoga su parametri rezanja prikladno odabrani.

8. ZAKLJUČAK

Plinsko rezanje, rezanje plazmom te lasersko rezanje najčešći su postupci toplinskog rezanja koji se primjenjuju u industriji. Potrebno je iznimno poznavanje postupaka toplinskog rezanja kako bi se primjenio najadekvatniji ovisno o vrsti i debljini materijala te zahtjevanoj točnosti.

Cilj eksperimentalnog rada je bio odrediti parametre kojima se postiže maksimalna brzina rezanja te zadovoljavajuća kvaliteta reza, detektirati nepravilnosti reza prema normi HRN EN ISO 17658 te ocijeniti kvalitetu reza prema normi HRN EN ISO 9013.. Prevelika ili premala brzina rezanja rezultira jako lošom kvalitetom reza te pojavom niza nepravilnosti. Utvrđeno je da brzina rezanja kod plinskog postupka uvelike utječe na kvalitetu reza te je moguće postići kvalitetan rez mijenjanjem samo tog parametra. Na kvalitetu reza postignutog plazma rezanjem velikim dijelom uz brzinu rezanja utječu i ostali parametri. Prilikom rezanja ti parametri nisu u velikoj mjeri varirani te je stoga došlo do pojave lošije kvalitete reza nehrđajućeg čelika dok je kod alumija postignuta iznadprosječna kvaliteta. Stoga je potrebna daljnja optimizacija parametara rezanja koji se za rezanje plazmom uvelike razlikuju za pojedini materijal. To se prije svega odnosi na parametar vrste odnosno kombinacije plazmenih plinova, koji je bio konstantan tokom cijelog procesa rezanja.

Kontrola točnosti i kvalitete rezova ima iznimno važnu ulogu u održavanju kontinuirane kvalitete proizvodnje. Stoga je bitno korištenje podataka koji se mogu dobiti iz normi i raznih priručnika kojima je moguće dobiti informacije o postizivim kvalitetama rezova. Budući da nepravilnosti rezova direktno utječu na slijedeće faze proizvodnje, moguće je samo povećanje troškova kako napreduju faze proizvodnje određenog proizvoda. Pridržavanje preporuka proizvođača, tj. adekvatno održavanje opreme u velikoj mjeri utječe na ostvarene rezultate te je to osnovni preduvjet prema kvalitetnoj proizvodnji.

LITERATURA

- [1] Prof. dr. sc. Tomislav Filetin: Autorizirana predavanja iz kolegija Izbor materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [2] Oblikovanje zavarenih konstrukcija, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod
- [3] Z. Kožuh, Z. Glogović, I. Garašić, V. Petrović: Usporedba plinskog rezanja acetilenom i propan-butanom, Zavarivanje 53 (2010) 3/4, 73-81
- [4] R.L. O'Brien: Welding handbook, Eight edition, Welding processes, American Welding Society, Miami, 1991.
- [5] URL: <https://image.slidesharecdn.com/advancedwelding-130905003817-/95/advanced-welding-14-638.jpg?cb=1378341573> – pristupljeno 8.9.2017.
- [6] URL: <https://www.weldmart.co.za/wp-content/uploads/2017/02/1-Piece-cutting-torch-600x147.jpg> - pristupljeno 8.9.2017.
- [7] Janez Gale: Rezanje plazmom, Zavarivanje 34 (1991) 1/2, 39-44
- [8] Facts about plasma technology, Plasma cutting, Linde gas
- [9] Josip Mioč, Rezanje plazmom, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2011.
- [10] URL: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/how-to-select-and-operate-a-hand-held-plasma-cutter> - pristupljeno 9.9.2017.
- [11] H. Simler, V. Krink, F. Laurisch; Suvremena tehnologija rezanja plazmom, Zavarivanje 48 (2005), 1/2, 5 – 12
- [12] B. Bauer, Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [13] B.Bauer; Predavanja: Rezanje laserom – EWE tečaj

- [14] M.Vlahov: Optimizacija parametara laserskog rezanja, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2013.
- [15] J.Ion: Laser Processing of Engineering materials, 2005.
- [16] Zavarivanje – Nepravilnosti rezova pri plinskom rezanju, rezanju laserskim snopom i rezanju plazmom – Nazivlje (ISO 17658:2002; EN ISO 17658:2015)
- [17] S.Kralj, Z.Kožuh, I.Garašić: podloge iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje, Zagreb 2003.
- [18] URL: <http://www.unicut.hr/hr/optotaj.html> - pristupljeno 19.9.2017.
- [19] URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022> – pristupljeno 22.9.2017.
- [20] URL: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a> – pristupljeno 22.9.2017.
- [21] URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804> –pristupljeno 22.9.2017.
- [22] Toplinsko rezanje – Razradba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće (ISO 9013:2002; EN ISO 9013:2002)

PRILOZI

II. CD-R disc